

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ**

**ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к самостоятельному изучению
дисциплины**

**ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*(для студентов 3 дневного и 4 заочного курсов
форм обучения по направлению подготовки
6.050702 «Электромеханика» специальности
«Электромеханические системы автоматизации и электропривод»)*

ХАРЬКОВ – ХНАГХ – 2012

Методические указания к самостоятельному изучению дисциплины «Элементы автоматизированного электропривода» (для студентов 3 курса дневной и 4 курса заочной форм обучения по направлению подготовки 6.050702 «Электромеханика» специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод») / Харк. нац. акад. гор. хоз-ва; состав.: В. Н. Фатеев. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 74 с.

Составитель доц. В. Н. Фатеев

Утверждено на заседании кафедры Электрического транспорта,
протокол № 5 от 23.11.2010г.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленно-развитых странах электропривод является основным потребителем электроэнергии. В нашей стране более 65% вырабатываемой электроэнергии преобразовывается электроприводом в механическую энергию, что обеспечивает высокий уровень энерговооруженности труда, рост его производительности.

Знание свойств и возможностей электропривода позволяет инженеру-электромеханику обеспечить его рациональное использование с учетом требований технологических машин и систем электроснабжения.

В соответствии с учебным планом специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» для дисциплины «Элементы автоматизированного электропривода» выделены четыре кредита которые заполнены тремя содержательными модулями.

В список литературы, рекомендуемые для самостоятельного изучения курса «Элементы автоматизированного электропривода» входят:

1. Теория электропривода. Підручник/ М.Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича.- К.: Вища школа, 1993,-494 с.:іл.
2. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов.-М.: Энергоатомиздат; 1986.-416с.: ил.
3. Челикин М.Г., Сндлер А.С., Общий курс электропривода. – М.: Энергия, 1981.
4. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1979.-318с., ил.

Работу по самостоятельному изучению курса «Элементы автоматизированного электропривода» целесообразно построить следующим образом: вначале необходимо по рекомендованной литературе изучить учебные элементы содержательного модуля, а затем ответить на контрольные вопросы для данного модуля. Если на какой-либо вопрос ответить затруднительно, нужно найти соответствующий материал в учебнике и еще раз проработать его.

Содержание курса.

Методические указания и контрольные вопросы к модулям

Содержательный модуль 1.

Математические операторы преобразования элементов автоматизированного электропривода

Учебный элемент 1.1.

Функциональные схемы, математические уравнения и передаточные функции механической части электропривода

Автоматизированный электропривод представляет собой электромеханическую систему, в которой, во-первых, осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. Посредством этой энергии приводятся в движение рабочие органы технологической машины. И, во-вторых, происходит управление процессом преобразования энергии с целью обеспечения требуемых установившихся и переходных режимов работы ТМ.

Механическая энергия от вала двигателя к рабочему органу передается с помощью механического передаточного устройства, которое в общем случае включает в себя различные механические элементы – шестерни, канаты, валы, муфты сцепления, шкивы и т.д. Эти элементы вращаются или движутся поступательно с разной скоростью, имеют определенную жесткость и момент инерции (массу), а соединения между ними в общем случае содержат зазоры. Наличие этих свойств элементов МПУ вносит определенные искажения в процесс передачи движения от двигателя к исполнительному органу и требует соответствующего учета. Анализ механического движения осуществляется с помощью расчетных схем электропривода, получаемых по определенным правилам.

Механическое движение элементов электропривода описывается с помощью законов электромеханики. Из курса физики известно, что движение материального тела определяется вторым законом Ньютона, причем уравнение этого движения имеет вид:

для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси,

$$\sum \vec{M} = J \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

и для поступательно движущегося тела

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt},$$

где $\sum \vec{M}$ и $\sum \vec{F}$ – векторные суммы моментов или сил, действующих на тело; J и m – момент инерции и масса тела; $d\vec{\omega}/dt = \vec{\epsilon}$ – угловое ускорение вращающегося тела; $d\vec{v}/dt = \vec{a}$ – ускорение поступательно движущегося тела.

Эти уравнения позволяют однозначно определить характер механического движения электропривода. Если $\sum \vec{M} \neq 0$ или $\sum \vec{F} \neq 0$, то электропривод совершает движение с ускорением. В другом случае, когда $\sum \vec{M} = 0$ или $\sum \vec{F} = 0$, электропривод движется с установившейся скоростью или находится в состоянии покоя.

Поскольку при движении тела вокруг неподвижной оси или при поступательном движении тела вдоль прямолинейной оси все векторные величины направлены вдоль одной оси, то вместо них можно использовать скалярные величины. Поэтому в дальнейшем не используется запись уравнений в векторном виде.

Элементы механической части привода механически связаны друг с другом и образуют единую кинематическую цепь от двигателя к исполнительному органу. Каждый элемент имеет свою скорость движения и характеризуется моментом инерции или массой, а также совокупностью действующих на него моментов и сил. Учет взаимодействия этого элемента с остальной частью кинематической цепи удобно осуществлять путем приведения моментов и усилий, а также моментов инерции и масс. В результате выполнения этой операции приведения реальная кинематическая схема заменяется расчетной энергетически эквивалентной схемой, основу которой составляет тот элемент, движение которого рассматривается.

Приведение указанных величин может быть осуществлено к любому элементу механической части электропривода, но, как правило, этим элементом является вал электродвигателя. Это позволяет наиболее полно исследовать характер движения привода и режим его работы, точнее формировать законы

движения. Зная параметры кинематической схемы, можно определить и вид движения исполнительного органа. В некоторых более редких случаях поступают наоборот, осуществляя приведение всех величин к исполнительному органу.

Для выявления существа операции приведения обратимся к рис. 1.1а, на котором показана кинематическая схема электропривода подъемной лебедки. Двигатель ЭД через соединительную муфту М1, редуктор Р и муфту М2 приводит во вращение барабан Б, на котором навит канат К. К концу каната прикреплен крюк лебедки К_р (исполнительный орган механизма), к которому подвешивается груз массой m . Нагрузка электропривода определяется действием силы тяжести, а также трением движущихся частей. Этот вид нагрузки привода, называемый обычно потерями на трение, учитывается коэффициентами полезного действия (КПД) редуктора η_p и барабана η_b .

После приведения моментов инерции, масс и сил в схеме рис. 1.1а к валу двигателя получаем эквивалентную расчетную схему рис. 1.1б, в которой подлежат определению приведенные значения момента нагрузки (сопротивления) M_c и момента инерции J . Момент M_c в теории электропривода также называют статическим моментом.

Приведение момента нагрузки осуществляют исходя из равенства механической мощности нагрузки двигателя в реальной (рис. 1.1а) и эквивалентной (рис. 1.1б) схемах. Приведение момента нагрузки выполняют двумя способами в зависимости от направлений потока энергии в механической части. Если производится подъем груза, то двигатель совершает полезную работу по подъему грузу и покрывает потери мощности на трение в кинематической цепи. Энергия направляется от двигателя к исполнительному органу и баланс мощности в этом случае имеет вид

$$M_c \omega = F_{u,o} v_{u,o} / (\eta_p \eta_b),$$

откуда

$$M_c = F_{u,o} v_{u,o} / (\eta_p \eta_b \omega) = F_{u,o} \rho / (\eta_p \eta_b),$$

где M_c – приведенный к валу двигателя момент нагрузки (сопротивления); ω – угловая скорость ротора двигателя; $F_{u,o}$ – сила тяжести;

$v_{u,o}$ – скорость подъема груза; $\rho = v_{u,o} / \omega$ – радиус приведения кинематической цепи между двигателем и исполнительным органом.

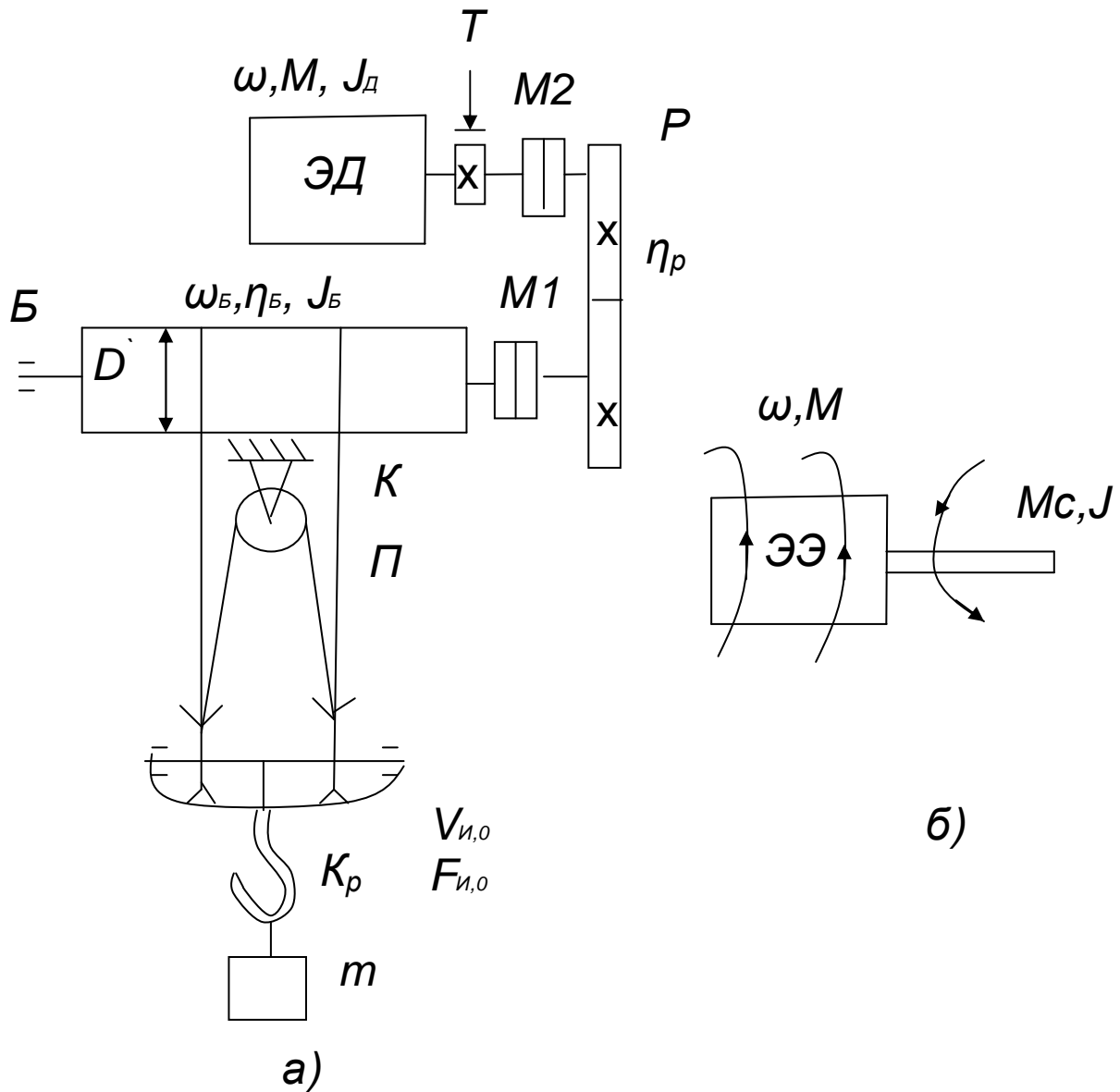


Рис. 1.1 – Схема механической части электропривода:
 а – реальная; б – приведенная расчетная

При опускании груза теряемая им потенциальная энергия передается к двигателю. Поэтому потери на трение в кинематической цепи покрываются уже за счет этой энергии и баланс мощностей имеет вид:

$$M_c \omega = F_{u,o} v_{u,o} \eta_p \eta_b,$$

откуда

$$M_c = F_{u,o} \eta_p \eta_b v_{u,o} / \omega = F_{u,o} \eta_p \eta_b \rho.$$

По аналогии с рассматриваемым случаем, если исполнительный орган совершает вращательное движение со скоростью $\omega_{и,о}$ и создает при этом момент нагрузки $M_{и,о}$, приведенный к валу двигателя момент нагрузки M_c определится по одной из формул

$$M_c = M_{и,о} \omega_{и,о} / (\eta \omega) = M_{и,о} / (\eta i);$$

$$M_c = M_{и,о} \eta \omega_{и,о} / \omega = M_{и,о} \eta / i,$$

где $i = \omega / \omega_{и,о}$ - передаточное число кинематической цепи между валом двигателя и исполнительным органом; η – КПД этой цепи.

Первая формула справедлива при направлении потока энергии от двигателя к исполнительному органу, вторая – при обратном направлении.

Приведение моментов инерции и масс элементов осуществляют исходя из равенства запаса кинематической энергии в реальной и эквивалентной расчетной схемах

$$J \omega^2 / 2 = J_d \omega^2 / 2 + J_6 \omega_6^2 / 2 + m v_{и,о}^2 / 2,$$

откуда находим

$$J = J_d + J_6 \frac{\omega_6^2}{\omega^2} + m \frac{v_{и,о}^2}{\omega^2} = I_d + J_6 / i^2 + m \rho^2,$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции элементов кинематической схемы; J_d – момент инерции двигателя, муфты М1 и шестерни z_1 ; J_6 – момент инерции шестерни z_2 , муфты М2 и барабана Б.

Обобщая полученный результат, заключаем, что для приведения момента инерции вращающегося элемента к валу двигателя следует разделить момент инерции на квадрат передаточного числа участка кинематической цепи между двигателем и этим элементом, а для приведения массы поступательно движущегося элемента следует умножить массу на квадрат радиуса приведения участка кинематической цепи между двигателем и этим элементом.

В результате выполнения приведения по указанным правилам расчетная схема имеет вид рис. 1.1б. Отметим, что расчетная схема рис. 1.1б в теории электропривода получила название одномассовой механической системы. Она

соответствует механической части привода с абсолютно жесткими элементами и без зазоров.

Уравнение, описывающее движения одномассовой механической системы, называют уравнением движения электропривода.

В общей форме записи оно имеет вид:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В левой части уравнения движения знак «+» ставится в том случае, когда направление M или M_c совпадает с направлением скорости вращения ω , а знак «-», когда они направлены встречно.

Знак «+» перед M соответствует двигательному режиму работы электрической машины: двигатель преобразовывает ЭЭ в МЭ, развивает вращающий момент M и вращает одномассовую систему в направлении вращающего момента.

Знак «-» перед M соответствует режиму электрического торможения. Для перевода в этот режим работающего электропривода схема его включения или её параметры изменяются таким образом, что изменяется на противоположное направление вращающего момента M . А поскольку под действием инерционных сил направление вращения сохраняется, вращающий момент двигателя начинает тормозить движение одномассовой системы. Электрическая машина из двигательного переходит в генераторный режим работы. Она забирает запасённую в механической части привода МЭ, снижая тем самым скорость вращения механической части, преобразовывает её в ЭЭ и либо возвращает ЭЭ в сеть, либо она расходуется на нагрев двигателя.

Знак «+» перед M_c говорит о том, что M_c способствует вращению.

Знак «-» говорит о том, что препятствует.

Все моменты сопротивления можно разделить на две категории: 1- реактивные M_c ; 2 – активные или потенциальные M_c .

В первую категорию входят моменты сопротивления, появление которых связано с необходимостью преодолевать силу трения. Они всегда препятствуют

движению электропривода и изменяют свой знак при изменении направления вращения.

Во вторую категорию входят моменты создаваемые силой тяжести, а также силами растяжения, сжатия или скручивания упругих тел. Они связаны с изменением потенциальной энергии отдельных элементов кинематической схемы. Поэтому они могут как препятствовать, так и способствовать движению, не изменяя своего знака при изменении направления вращения.

Правая часть уравнения движения носит название динамического момента M_δ и проявляется только во время переходных режимов. При $M_\delta > 0$ и $\frac{d\omega}{dt} > 0$, т.е. имеет место ускорение механической части привода. При $M_\delta < 0$ и $\frac{d\omega}{dt} < 0$ - имеет место замедление. При $M = M_c$, $M_\delta = 0$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$, т.е. в данном случае привод работает в установившемся режиме и механическая часть вращается с постоянной скоростью.

На примере электропривода подъёмной лебёдки можно рассмотреть все четыре формы записи уравнения движения электропривода.

В первом случае электропривод включён в направлении подъёма груза. Двигатель работает в двигательном режиме. Груз, подвешенный на крюке, создаёт активный момент сопротивления, препятствующий вращению. Тогда уравнение движения будет иметь вид: $+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

Во втором случае в конце подъёма груза двигатель переводится в режим электрического торможения и его момент, как и момент сопротивления, будет препятствовать вращению. Уравнение движения в этом случае имеет вид:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В третьем случае электропривод включён в направлении опускания груза, т.е. двигатель работает в двигательном режиме. Поскольку момент сопротивления, создаваемый поднятым грузом, является активным, то при

опускании груза он будет не препятствовать, а способствовать вращению.

Уравнение движения имеет вид: $+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

В четвёртом случае в конце опускания груза двигатель опять переводится в режим электрического торможения, а момент сопротивления продолжает вращать двигатель в направлении спуска. В этом случае уравнение движения имеет вид: $-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

Для указанных на рис. 1.1б направлений моментов двигателя и нагрузки, которые относятся к самому распространенному двигательному режиму работы электропривода, когда движение осуществляется под действием вращающего момента двигателя, а момент нагрузки противодействует движению, уравнение движения одномассовой механической системы записывается как

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Записанное в общем виде и преобразованное по Лапласу, уравнение движения будет иметь вид:

$$Jp\omega(p) = M(p) - M_c(p).$$

Передаточная функция одномассовой системы

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{1}{Jp}.$$

Структурная схема одномассовой системы приведена на рис. 1.2

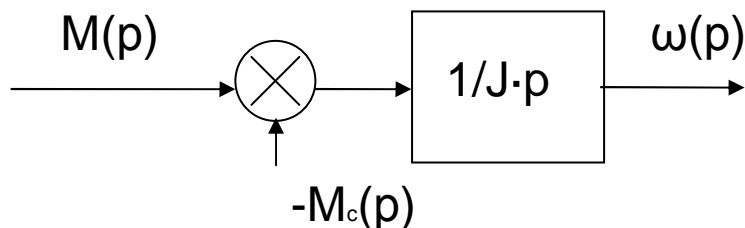


Рис. 1.2 – Структурная схема одномассовой механической системы

Как следует из структурной схемы, вращающий момент двигателя представляет собой управляющее воздействие, а момент сопротивления – возмущающее воздействие.

Учебный элемент 1.2.

Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции электрических двигателей

Двигатели постоянного тока. Выпускаемые серийно двигатели постоянного тока имеют независимое, последовательное и смешанное возбуждение. Двигатели независимого возбуждения выпускаются с электромагнитной полюсной системой и постоянными магнитами на полюсах. Двигатели последовательного и смешанного возбуждения имеют электромагнитную полюсную систему. Основными сериями двигателей общепромышленного применения являются в настоящее время единые серии П и 2П и их модификации.

Специализированные серии двигателей постоянного тока предназначены для работы в станочных, тяговых, краново-металлургических, судовых, текстильных и других устройствах.

По габаритам двигатели серии П делятся на три группы: 1-11-й габариты мощностью 0,3-200 кВт; 12-17-й – 200-1400 кВт; 18-26-й – свыше 1400 кВт.

Ряд номинальных напряжений питания двигателей постоянного тока общего назначения – 110, 220, 440 В.

Двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения приведена на рис. 1.3. Здесь L1M – обмотка независимого возбуждения, L2M – обмотка дополнительных полюсов, L3M – компенсационная обмотка двигателя М. Схема рис. 1.3 обеспечивает независимость тока возбуждения от тока якоря вследствие наличия независимого источника питания UZ. Магнитное состояние машины зависит от тока возбуждения и устанавливается по кривой намагничивания.

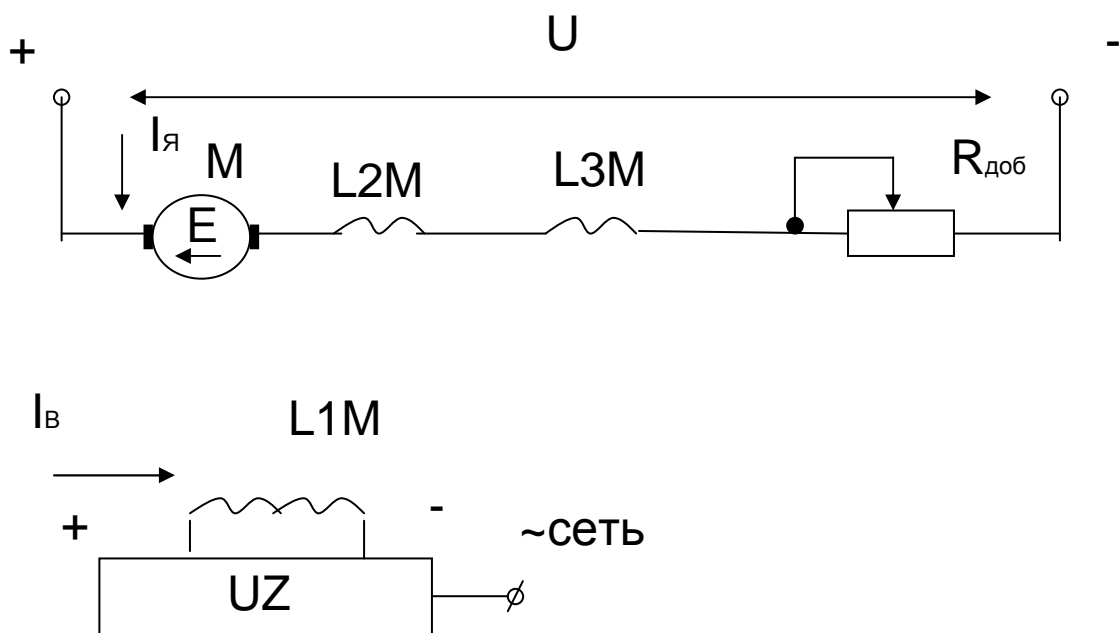


Рис. 1.3 – Схема включения ДПТ НВ

Переходный процесс в ДПТ НВ можно условно разделить на два: электромагнитный переходный процесс в электрической части двигателя и электромеханический – в механической части.

Электромагнитный переходный процесс в якорной цепи описывается уравнением электрического равновесия. В соответствии со вторым законом Кирхгофа и обозначениями на рис. 1.3 имеем:

$$U = I_{я} R_{яц} + L_{яц} \frac{dI_{я}}{dt} + E,$$

где $R_{яц} = R_{я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{ДОБ}$ – полное активное сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря $R_{я}$, обмотки дополнительных полюсов $R_{ДП}$, компенсационной обмотки $R_{КО}$ и добавочного пускового сопротивления $R_{ДОБ}$; $L_{яц} = L_{я} + L_{ДП} + L_{КО}$ – полная индуктивность якорной цепи, состоящая из индуктивности обмотки якоря $L_{я}$, обмотки дополнительных полюсов $L_{ДП}$ и компенсационной обмотки $L_{КО}$; $E = k \cdot \Phi_n \cdot \omega$ – э.д.с. вращения, которая наводится в обмотке якоря двигателя; $k = p \cdot N / 2\pi a$ – конструктивный коэффициент двигателя; p , N , a – соответственно число пар полюсов двигателя, активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря; Φ_n – номинальный магнитный поток двигателя; ω – угловая скорость двигателя.

При расчетах электромеханических свойств двигателя значения κ и Φ_n отдельно не используются. Удобнее оперировать произведением этих величин. Оно определяется по паспортным данным двигателя на основании уравнения электрического равновесия для установившегося режима:

$$U_n = I_{ян} R_{яц} + \kappa \Phi_n \omega_n,$$

откуда величина $\kappa \Phi_n$ будет равна:

$$\kappa \Phi_n = U_n / \omega_n - I_{ян} R_{яц} / \omega_n.$$

Значения активных сопротивлений обмоток двигателя приводятся в каталогах. Индуктивность якорной цепи может быть рассчитана по формуле

$$L = \gamma U_n / p \omega_n I_{ян},$$

где $\gamma = 0,25$ для компенсированных и $\gamma = 0,6$ для некомпенсированных двигателей.

Если уравнение электрического равновесия записать в общей форме и разделить его левую и правую части на $R_{яц}$, то оно примет вид:

$$\frac{L_{яц}}{R_{яц}} \frac{dI_{я}}{dt} + I_{я} = \frac{1}{R_{яц}} (U - \kappa \Phi_n \omega),$$

где $L_{яц} / R_{яц} = T_{я}$ - постоянная времени, характеризующая скорость протекания электромагнитного переходного процесса и поэтому называемая электромагнитной постоянной времени.

После преобразования уравнения равновесия по Лапласу получим:

$$T_{я} p I_{я}(p) + I_{я}(p) = \frac{1}{R_{яц}} [U(p) - \kappa \Phi_n \omega(p)].$$

Передаточная функция электромагнитного переходного процесса

$$W(p) = \frac{I_{я}(p)}{U(p)} = \frac{1/R_{яц}}{T_{я} p + 1}.$$

Электромеханический переходный процесс описывается уравнением движения электропривода, которое для одномассовой механической системы имеет вид:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где $M = \kappa \Phi_n I_a$ – вращающий момент двигателя; $M_c = \kappa \Phi_n I_c$ – приведенный момент сопротивления; I_c – ток в якорной цепи при установившемся режиме работы двигателя, называемый током статической нагрузки; J – приведенный момент инерции электропривода.

Разделив обе части уравнения движения на $R_{яц} / (\kappa \Phi_n)^2$ и переписав его в общем виде, получим:

$$\frac{JR_{яц}}{(\kappa \Phi_n)^2} \frac{d\omega}{dt} = \frac{R_{яц}}{\kappa \Phi_n} (I_a - I_c),$$

где $JR_{яц} / (\kappa \Phi_n)^2 = T_m$ – постоянная времени, характеризующая скорость протекания электромеханического переходного процесса и поэтому называемая электромеханической постоянной времени.

После преобразования уравнения движения по Лапласу получим

$$T_m p \omega(p) = \frac{R_{яц}}{\kappa \Phi_n} [I_a(p) - I_c(p)].$$

Передаточная функция электромеханического переходного процесса

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{I_a(p)} = \frac{R_{яц} / \kappa \Phi_n}{T_m p}.$$

Структурная схема ДПТ НВ приведена на рис. 1.4.

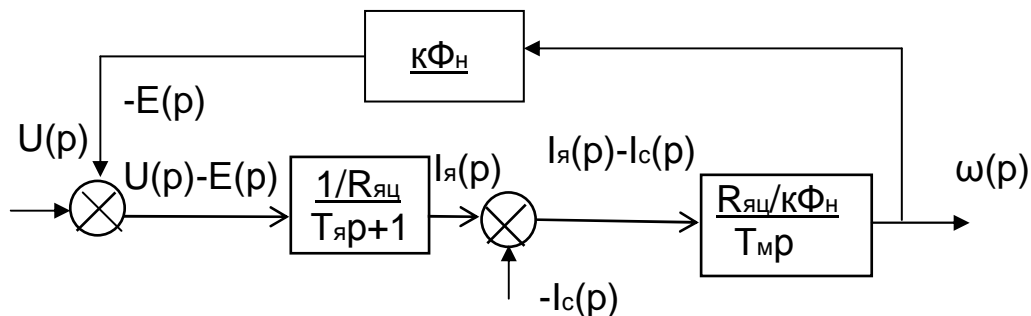


Рис. 1.4 – Структурная схема ДПТ НВ

Воспользовавшись правилами преобразования структурных схем, можно получить передаточную функцию ДПТ НВ по управлению

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{1 / \kappa \Phi_n}{T_я T_m p^2 + T_m p + 1}.$$

Переходная характеристика ДПТ НВ зависит от корней характеристического уравнения $T_{\text{я}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1 = 0$

$$p_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4T_{\text{я}} / T_{\text{м}}}}{2T_{\text{я}}}.$$

При $T_{\text{м}} < 4T_{\text{я}}$ корни характеристического уравнения будут комплексные сопряженные с отрицательными вещественными частями $p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$. Переходный процесс будет носить характер затухающих колебаний. Такое соотношение справедливо при отсутствии в якорной цепи двигателя добавочных резисторов, т.е. при расчете переходных процессов разгона, торможения, наброса и сброса нагрузки в случаях, когда двигатель работает на естественной характеристике.

Включение добавочных резисторов в якорную цепь двигателя приводит к уменьшению $T_{\text{я}}$. При $T_{\text{м}} > 4T_{\text{я}}$ корни характеристического уравнения становятся вещественными и колебательный процесс вырождается в апериодический второго порядка.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ)

Схема включения ДПТ ПВ приведена на рис. 1.5. Обмотка возбуждения L1М двигателя включается последовательно с якорем и обмоткой дополнительных полюсов L2М. Поэтому ток возбуждения $I_{\text{в}}$, а следовательно, и поток возбуждения Φ определяются нагрузкой на валу двигателя.

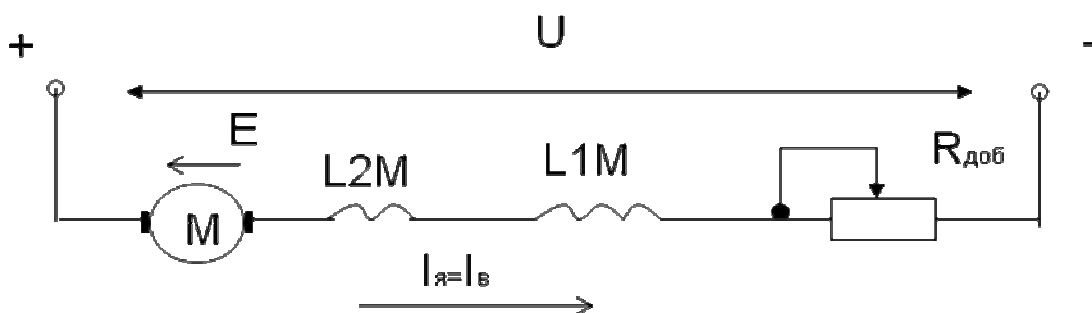


Рис. 1.5 – Схема включения ДПТ ПВ

Кривая намагничивания $\Phi = f(I_{\text{я}})$ имеет вид нелинейности типа «зона насыщения». Точка, соответствующая номинальному току якоря $I_{\text{я ном}}$, располагается на колене кривой намагничивания. При $I_{\text{я}} > I_{\text{я ном}}$ незначительное

увеличение потока компенсируется реакцией якоря и результирующий поток, пересекающий обмотку якоря, практически остается постоянным ($\kappa\Phi \approx const$). Поэтому расчет переходных процессов и динамических свойств ДПТ ПВ аналогичен расчету для ДПТ НВ. При $I_{\text{я}} < I_{\text{я ном}}$ линейные методы расчета переходных процессов непригодны и следует пользоваться не линейными методами.

Двигатели постоянного тока со смещенным возбуждением (ДПТ СВ)

Схема включения ДПТ СВ приведена на рис. 1.6.

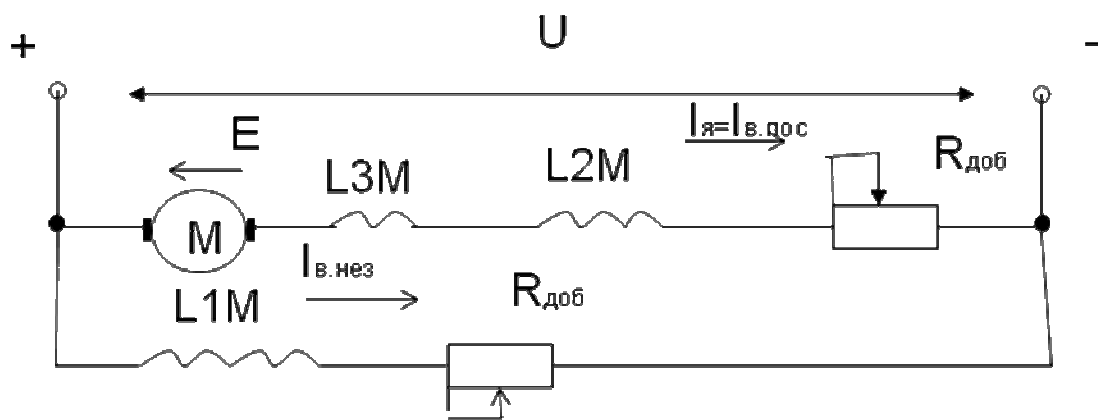


Рис. 1.6 – Схема включения ДПТ СВ

Двигатель имеет две обмотки возбуждения: независимую L1M и последовательную L2M. В двигательном режиме, для которого на рис. 1.6 показаны направления токов в обмотках возбуждения, магнитные потоки обмоток направлены согласно. При этом большая часть магнитного потока при номинальном режиме работы обеспечивается независимой обмоткой и в зависимости от типа двигателя может составлять $\Phi_{\text{нез}} = (0,615 \div 0,72)\Phi_{\text{ном}}$. Характеристики ДПТ СВ приближаются к соответствующим характеристикам ДПТ НВ или ДПТ ПВ в зависимости от отношения потоков $\Phi_{\text{нез}}$ и $\Phi_{\text{посл}}$. Скорость идеального холостого хода ДПТ СВ при $\Phi_{\text{посл}}=0$ составляет $(1,3 \div 1,6)\omega_{\text{ном}}$. Она несколько выше, чем соответствующее значение для ДПТ НВ, но существенно ниже, чем для ДПТ ПВ.

По перегрузочной способности ДПТ СВ также занимают промежуточное положение. Если при допустимом токе якоря $I_{я\text{ доп}}=2,5 I_{я\text{ ном}}$ допустимый момент $M_{доп}$ для ДПТ НВ составляет $M_{доп}=2,5 M_{ном}$, для ДПТ ПВ $M_{доп}=3 M_{ном}$, то для ДПТ СВ $M_{доп}=2,7 M_{ном}$.

Расчет переходных процессов и динамических свойств ДПТ СВ аналогичен расчету для ДПТ ПВ.

Асинхронный двигатель (АД). Самый распространенный вид двигателей, т.к. они более просты в устройстве и надежны в эксплуатации, при равной мощности имеют меньшую массу, габариты и стоимость чем ДПТ. Схемы включения АД приведены на рис. 1.7.

Выпускаются АД сериями и предназначены для питания от трехфазной сети 0,4 кВ с частотой 50Гц при синхронных скоростях от $\omega_0=314$ рад/с и менее.

В обозначение типа АД всех серий общепромышленного применения входит буква А – асинхронный. Промышленностью выпускается серия двигателей 4А, которые имеют стандартную шкалу мощностей от 0,06 кВт до 400 кВт при всех скоростях вращения.

Кроме общепромышленных, выпускаются специальные серии АД: крановые АД с фазным ротором серий МТФ и МТН и с короткозамкнутым ротором серий МТКФ и МТКН.

Асинхронный двигатель представляет собой сложное электромеханическое устройство, состоящее из магнитосвязанных обмоток статора и ротора, непрерывно изменяющий свое взаимное положение в пространстве. Вследствии этого возникающие электромагнитные переходные процессы отличаются большой сложностью. Переходные токи в обмотках статора и ротора в общем случае содержат вынужденную, свободную составляющие и изменяются по сложным колебательным зависимостям.

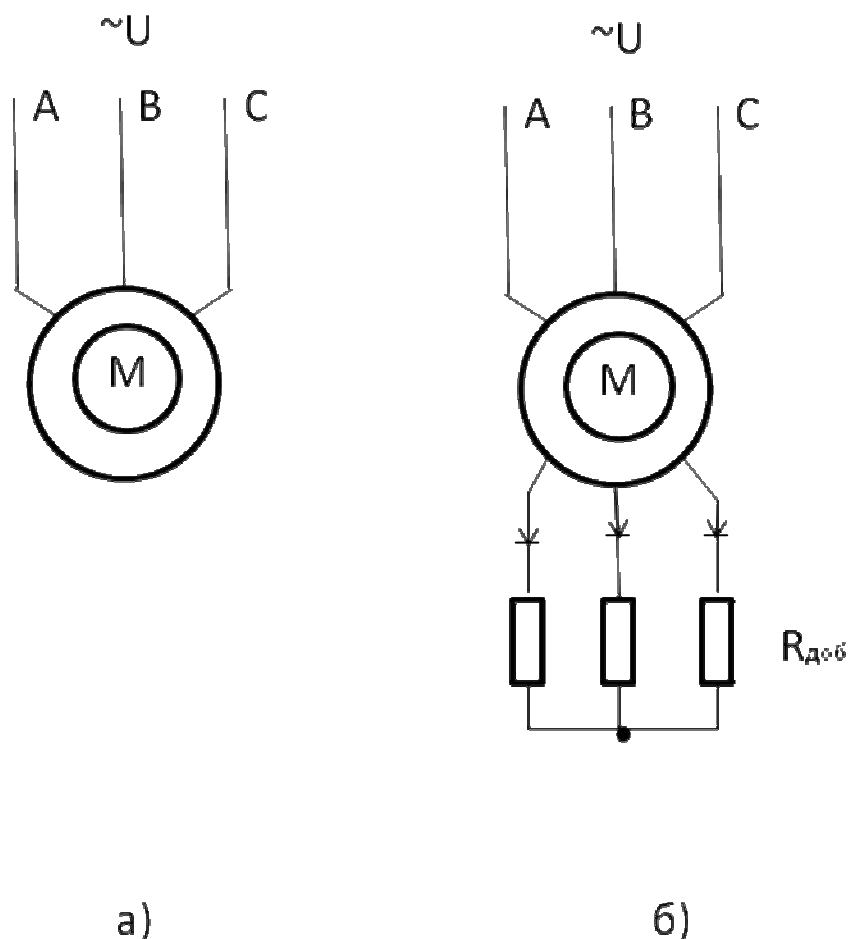


Рис. 1.7: а) схема включения АД с короткозамкнутым ротором;
 б) схема включения АД с фазным ротором/

Вследствии этого и электромагнитный момент АД в переходных процессах имеет колебательный характер и является сложной функцией времени. Магнитные поля, образуемые свободными составляющими токов, могут либо усиливать, либо ослаблять основное поле, создаваемое вынужденными составляющими токов, вызывая соответствующее усиление или ослабление переходного электромагнитного момента. Их влияние проявляется в значительных пиках переходного электромагнитного момента двигателя, которые при пуске в 3-5 раз, а при реверсе в 12-18 раз превышают номинальный момент АД.

Математически переходные процессы в АД описываются сложными дифференциальными уравнениями, которые по своей природе нелинейны и содержат периодические коэффициенты. Даже при использовании ЭВМ и

принятии ряда упрощений решение этой системы уравнений оказывается затруднительным.

В связи с этим, анализ переходных процессов в асинхронном электроприводе целесообразно проводить в двух направлениях. Одно из них должно предусматривать оценку максимальных значений электромагнитного переходного момента АД. Другое направление посвящено рассмотрению только механических переходных процессов, что позволяет получить оценочное представление об общем характере изменения координат во времени, в том числе оценить время переходных процессов.

Учебный элемент 1.3.

Схемы включения, математические уравнения и передаточные функции преобразователей постоянного и переменного тока, управляющих и функциональных элементов

Применение тиристорных преобразователей в электроприводах постоянного тока позволяет повысить быстродействие электропривода, расширить диапазон регулирования скорости до 1000:1 и более, улучшить энергетические показатели электропривода. В частности, к.п.д. системы тиристорный преобразователь - двигатель на 5-7 % выше к.п.д. системы генератор - двигатель. Вместе с тем, тиристорный преобразователь имеет повышенную чувствительность к перегрузкам, а пульсирующий характер выпрямленного тока увеличивает потери в двигателе и уменьшает его коммутационную способность.

В реверсивном электроприводе для питания якоря двигателя необходимо использовать реверсивный тиристорный преобразователь. Изменение полярности напряжения на зажимах якоря работающего двигателя переводит его в режим торможения противовключением, что обеспечивает минимальное время торможения. После остановки двигатель сразу же начинает разгон в противоположном направлении. Это обеспечивает минимально возможное

время реверса и поэтому способствует повышению производительности технологической машины.

Функциональная схема реверсивного тиристорного преобразователя типа АТЕР приведена на рис. 1.8. Они выпускаются мощностью до 1150 кВт [5]. Преобразователи с номинальным выпрямленным напряжением 460 В подключаются непосредственно к сети с линейным напряжением 380 В, а преобразователи с номинальным выпрямленным напряжением 230 В подключаются к сети 380 В через согласующий трансформатор.

Схема выпрямления преобразователей трехфазная, мостовая полностью управляемая. Реверсивность обеспечивается встречно-параллельным включением двух трехфазных мостовых выпрямителей БТ1 и БТ2 с отдельным управлением каждым выпрямителем. Для этого импульсы управления тиристорами с выхода системы импульсно-фазового управления (СИФУ) подаются на ключ К, который по команде логического переключающего устройства Л в зависимости от необходимого направления вращения двигателя подает импульсы управления на один из выпрямителей.

Система импульсно-фазового управления выполняется по вертикальному принципу с линейным опорным напряжением. Сигнал управления U_y на вход СИФУ подается с выхода полупроводникового усилителя УП, который осуществляет алгебраическое суммирование входных сигналов и усиление результирующего сигнала.

Коррекция динамических характеристик электропривода и ограничение тока перегрузки осуществляется посредством устройств коррекции и токоограничения УКТ.

Защита силовых цепей от токов короткого замыкания осуществляется быстродействующими устройствами токовой защиты УТЗ, а защита тиристоров от перенапряжения - устройством УЗП.

Для преобразователя с инерционной системой управления, имеющей постоянную времени $T_{y,п} > 0,0064$ с, или при безинерционной системе управления, но со специально включенным звеном ограничения скорости нарастания входного сигнала ТП (апериодическим звеном с постоянной времени $T_0 \geq 0,0064$ с), чистое запаздывание учитывать не нужно. Тогда передаточная функция преобразователя по каналу управляющего воздействия

$$W(p) = k_{т.п} / (T_{y.п} p + 1)$$

или

$$W(p) = k_{т.п} / (T_0 p + 1).$$

Тиристорный регулятор напряжения. Одна из распространенных схем тиристорного регулятора напряжения (ТРН) приведена на рис. 1.9. В простейшем случае ТРН используют как переключатель— статический контактор —для включения и отключения асинхронных двигателей, в частности короткозамкнутых. В реверсивных схемах добавляют еще один комплект тириستоров. Возможна также реализация режима динамического торможения двигателя. Регулирование угла отпирания тиристоров α (отсчитываемого от начала положительной полуволны фазного напряжения сети) в пределах от нуля до 150 эл. градусов соответствует практически изменению напряжения на двигателе U_d от напряжения сети U_c до нуля. Поэтому, например, плавно изменяя при пуске двигателя угол α от 150° до нуля, можно нести до минимума вредное влияние электромагнитных переходных процессов в обмотке двигателя.

Для двигателей с фазным ротором ТРН применяют и как управляемый преобразователь в системах стабилизации скорости двигателя.

Особенности динамики ТРН определяются постоянной времени T_y системы управления тиристорами и чистым запаздыванием $\tau \approx 0,0067$ с. В линейном приближении передаточная функция ТРН имеет вид:

$$W(p) = \frac{\Delta \alpha(p)}{\Delta u_y(p)} = \left[\frac{k_{т.п.н.}}{T_y z + 1} \right] e^{-\tau p},$$

где $k_{т.р.н.} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta U_y}$ находят по характеристике устройства импульсно-

фазового управления тиристорами.

Часто на практике можно пренебречь величинами T_y и τ , считая ТРН безынерционным звеном.

Тиристорный коммутатор. Для бесконтактного импульсного регулирования величины добавочного сопротивления в роторе асинхронного двигателя применяют схему, изображенную на рис. 1.10. Добавочное сопротивление $R_{доб}$ последовательно с обмоткой ротора через выпрямительный мост Вп и сглаживающий реактор РС. Сопротивление $R_{доб}$ либо полностью вводят в схему, либо замыкают накоротко при помощи тиристорного коммутатора ТК, представляющего собой тиристорный ключ постоянного тока.

При достаточно большой частоте коммутации ключа можно считать, что в цепь выпрямленного тока ротора помещено регулируемое «импульсное» добавочное сопротивление $R_{доб\text{ имп}}$, величина которого плавно изменяется от 0 до $R_{доб}$.

Тиристорный коммутатор, так же, как и рассмотренный тиристорный регулятор напряжения, практически можно считать безынерционным звеном.

Тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ) для регулируемых электроприводов выполняют обычно по схеме с промежуточным звеном

Замкнутые электропривода с использованием преобразователей частоты.

В общем случае частотное управление двигателя, реализуемое с помощью преобразователей частоты, может быть осуществлено по трем вариантам:

- параметрическое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение подаваемого на двигатель напряжения;
- частотно-токовое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение тока двигателя;

- векторное управление, связанное с регулированием мгновенных значений питающих напряжений и токов с целью формирования электромагнитного момента двигателя нужной величины.

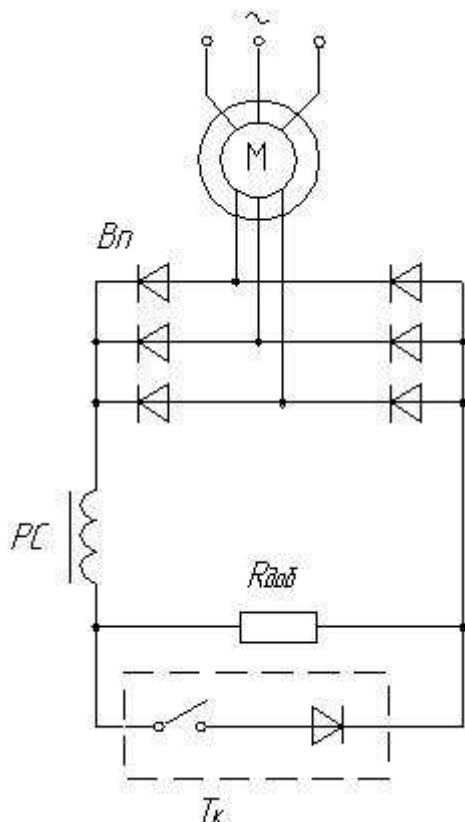


Рис. 1.9 – Функциональная схема тиристорного коммутатора

Замкнутый электропривод с параметрическим частотным управлением

С использованием этого принципа построены многие частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. В них за счет использования различных обратных связей и функциональных блоков формируются жесткие рабочие участки механических характеристик двигателя для качественного регулирования его скорости, ограничиваются ток и момент и обеспечивается требуемое соотношение между регулируемой частотой и напряжением. Обобщенная схема такого электропривода представлена на рис. 1.10.

В качестве силового преобразователя используется преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из неуправляемого выпрямителя В и инвертора напряжения, выполненного на шести силовых модулях, состоящих из транзистора и диода. Между выпрямителем и инвертором включен фильтр,

состоящий из реактора L и конденсатора C , обеспечивающий сглаживание выходного напряжения выпрямителя и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

Инвертор работает в режиме широтно-импульсной модуляции и преобразует нерегулируемое напряжение постоянного тока на выходе фильтра в регулируемое по частоте и амплитуде напряжение на статоре двигателя M . Силовая схема электропривода нереверсивная и не предусматривает электрического торможения.

Управление инвертором осуществляется сигналами f_y и U_y , определяющими значения выходных частоты и напряжения преобразователя частоты. Формирование этих сигналов осуществляется схемой управления, в состав которой входят регулятор скорости PC , регулятор тока PT , датчики скорости $TГ$ и тока $ДТ$, суммирующие усилители (пропорциональные регуляторы) $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$, блок ограничения БО сигнала PC , функциональный преобразователь $ФП$, задатчик интенсивности $ЗИ$.

Регулятор скорости PC в совокупности с задатчиком интенсивности $ЗИ$ и сумматором $\Sigma 2$, обеспечивают требуемое регулирование скорости и ускорения двигателя в установившемся и переходных режимах работы электропривода с помощью сигнала f_y .

Ограничение тока статора и момента двигателя производится регулятором тока PT , когда ток статора двигателя меньше тока уставки I_M , сигнал на выходе PT равен нулю и схема управления обеспечивает режим поддержания заданной скорости. Когда ток статора превысит уставку тока I_M , резко увеличивается сигнал на выходе PT , из-за чего резко снижается и сигнал на выходе сумматора Σ_1 . Это приводит к уменьшению частоты и напряжения на статоре двигателя и тем самым к ограничению тока статора и момента двигателя.

Функциональный преобразователь $ФП$, характеристика которого в виде ломаной линии $Oabc$ показана над его условным изображением на рис. 1.10, а, обеспечивает требуемое соотношение между частотой и выходным напряжением преобразователя частоты. Отрезком Oa создается начальное напряжение на выходе

преобразователя, необходимое для преодоления падения напряжения на обмотке статора двигателя при малых частотах напряжения. Участок ab обеспечивает пропорциональное изменение частоты и напряжения

(закон частотного управления $U/f=\text{const}$), при котором магнитный поток двигателя поддерживается постоянным. На участке bc величина напряжения на статоре остается неизменной, хотя при этом его частота может увеличиваться.

Для уменьшения влияния падения напряжения в цепи статора на величину магнитного потока двигателя и тем самым на его момент в схеме предусмотрена положительная обратная связь по току (так называемая IR -компенсация), сигнал которой поступает на вход сумматора Σ_2 . При увеличении нагрузки двигателя возрастает его ток и увеличивается сигнал U_y , за счет чего возрастает выходное напряжение преобразователя и тем самым компенсируется падение напряжения в обмотке статора.

В современных электроприводах этого типа реализация блоков управления схемы рис. 1.10, а осуществляется с использованием микропроцессорных средств, а настройка их параметров и характеристик производится программным путем.

В ряде случаев требуемое регулирование скорости может быть получено и в разомкнутой схеме без обратной связи по скорости. В этом случае в схеме отсутствуют РС и ТГ, а сигнал с выхода ЗИ непосредственно поступает на вход сумматора Σ_1 ; во всем остальном схема остается без изменения.

Рис. 1.10 - Схема асинхронного электропривода при частотном управлении

Схема частотно-токового управления АД. Схема электропривода представлена на рис. 1.11. Тиристоры VS1—VS6 образуют схему управляемого выпрямителя УВ, а тиристоры VS7—VS12 — схему автономного инвертора тока АИТ. Между этими блоками включен реактор L большой индуктивности с тем, чтобы придать инвертору свойства источника тока. Конденсаторы C1—C6 с диодами VD1—VD6 образуют цепи искусственной коммутации тириستоров VS7—VS12. Остальные элементы схемы имеют следующее назначение: СУВ и СУИ— схемы управления тиристорами выпрямителя и инвертора; РТ, ДТ— соответственно регулятор и датчик тока статора; ДС—датчик скорости; УО — усилитель-ограничитель; ФП— функциональный преобразователь. Схема работает следующим образом.

Задающий сигнал $U_{з.с.}$ задает частоту переключения тиристоров инвертора и тем самым частоту тока статора двигателя М. После вычитания из сигнала $U_{з.с.}$ сигнала обратной связи по скорости U_{ω} получается сигнал U_{β} , пропорциональный относительной частоте ротора $\beta = f_2/f_{1ном}$ (величину β называют также абсолютным скольжением двигателя). Она связана со скольжением s двигателя следующим соотношением: $\beta = \alpha s$, где $\alpha = f_1/f_{1ном}$.

Сигнал U_{β} , пройдя через УО, вместе с сигналом U_{ω} поступает на вход СУИ. Частота на выходе инвертора определяется сигналом $U_{\omega s} = U_{\omega} + U_{\beta}$; СУИ настроена таким образом, что пока УО работает в линейной зоне, частота на выходе инвертора будет постоянной и независимой от нагрузки. Двигатель при этом имеет жесткие механические характеристики.

Сигнал U_{β} , после прохождения через ФП является также сигналом для контура регулирования тока. Так как этот сигнал пропорционален абсолютному скольжению, то и ток двигателя при всех частотах будет ему пропорционален.

При резких изменениях задающего сигнала или при значительных перегрузках двигателя УО входит в зону ограничения (постоянства) своего выходного сигнала U_{β} , ограничивая тем самым на требуемом уровне и задание для тока. Двигатель при этом работает при любой скорости с постоянными

значениями абсолютного скольжения и тока, т.е. механическая характеристика становится абсолютно мягкой.

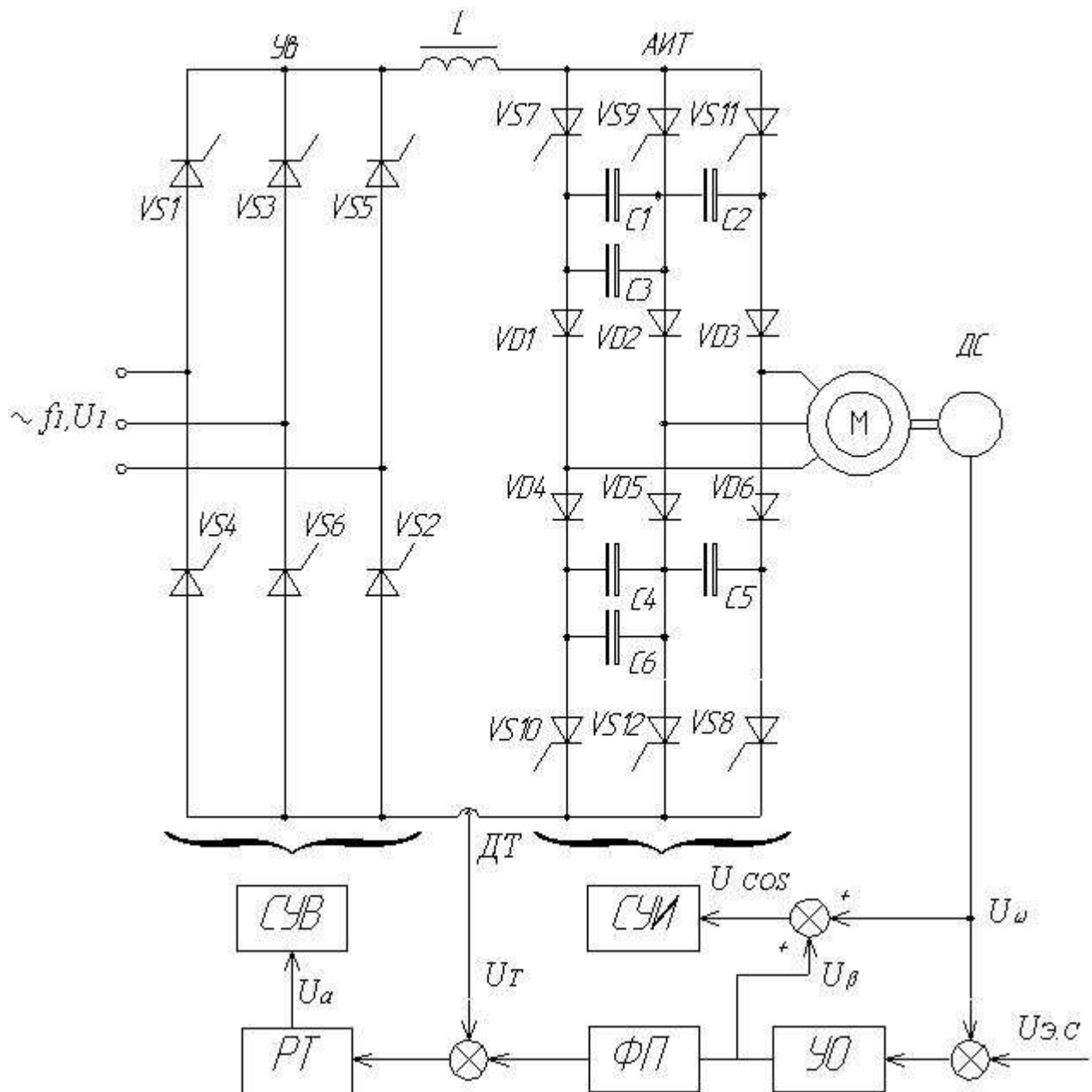


Рис. 1.11 – Схема асинхронного электропривода при частотно-токовом управлении

Схема позволяет осуществлять торможение двигателя с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть, для чего инвертор переводится в режим выпрямления, и выпрямитель — в режим инвертирования тока.

Схемы векторного управления асинхронными двигателями. При необходимости получения высокого качества и диапазонов регулирования переменных асинхронного электропривода в установившемся и переходных режимах применяются так называемые схемы векторного управления, в которых решение этих задач обеспечивается за счет формирования электромагнитного момента двигателя. Принцип формирования момента может быть показан следующим образом.

Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя может иметь различные формы записи в зависимости от используемых в этих уравнениях переменных и выбранной системы координат для их представления. При построении систем векторного управления процессы в двигателе удобно рассматривать в системе координат $X—Y$, в которой ось X совпадает по направлению с потокоцеплением ротора Ψ_2 и вращается с его скоростью. В этом случае уравнение электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя имеет вид:

$$M = \frac{3pL_{12}\Psi i_{1y}}{2L_2},$$

где p — число пар полюсов двигателя; L_{12} — взаимоиндуктивность между статором и ротором; i_{1y} — составляющая тока статора по оси Y ; L_2 — полная индуктивность ротора.

Так как составляющая тока статора i_{1x} по оси X определяет потокоцепление ротора Ψ_2 , то из рассмотрения формулы следует, что за счет регулирования i_{1x} и i_{1y} можно обеспечивать формирование момента двигателя. Составляющая i_{1x} может рассматриваться как намагничивающая реактивная составляющая тока статора двигателя, а i_{1y} его активная составляющая, идущая на создание момента двигателя.

Отметим, что уравнение для момента АД по своему виду аналогично формуле момента двигателя постоянного тока. В нем Ψ_2 отражает магнитный поток двигателя постоянного тока, а i_{1y} — ток его якоря.

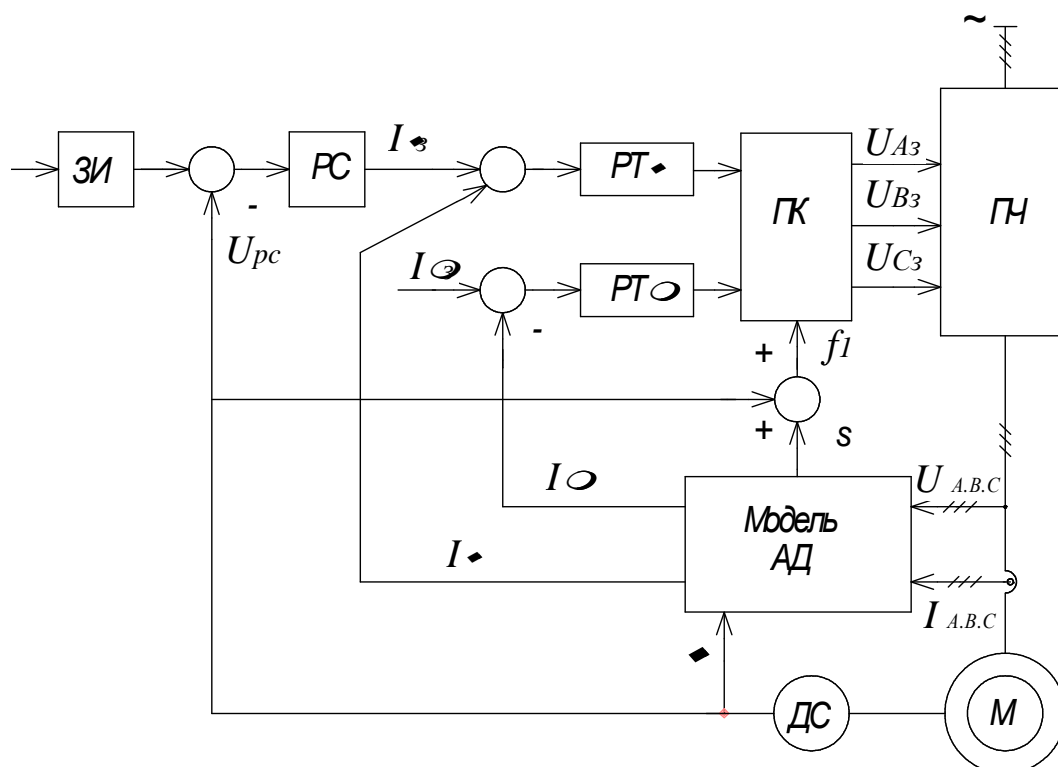


Рис. 1.12 – Схема асинхронного электропривода при частотном векторном управлении

Принцип построения схемы векторного управления иллюстрирует рис. 1.12. Асинхронный двигатель М, на валу которого установлен датчик скорости (тахогенератор) ДС, получает питание от преобразователя частоты ПЧ. Регулирование момента производится регуляторами $РТ_w$ активной I_w и $РТ_\mu$ реактивной I_μ составляющих тока. Значения этих переменных получаются косвенным путем с помощью модели асинхронного двигателя «Модель АД», на вход которой подаются сигналы фазных токов I_A , I_B , I_C , напряжений U_A , U_B , U_C и угловой скорости двигателя ω . Модель двигателя выдает информацию о скольжении двигателя s и составляющих токов I_μ и I_w .

Регулирование скорости производится по принципу подчиненного регулирования координат с использованием ПИ-регулятора скорости РС, задатчика интенсивности ЗИ и блока токоограничения БО. Управление ПЧ осуществляется системой трехфазных напряжений U_{A3} , U_{B3} , U_{C3} , которые формируются преобразователем координат ПК на основе сигналов регуляторов РТК и РГЦ и сигнала, пропорционального частоте f_l .

Управляющие и функциональные элементы. Требования высокой точности регулирования и высокого быстродействия, которые предъявляются к современному электроприводу, обуславливают применение замкнутых систем. Только замкнутые системы позволяют осуществить реализацию в электроприводе двух основных принципов:

1. Регулируемая величина на выходе электропривода (скорость, угол, момент и т.д.) должна по возможности точнее повторять задающий (входной) сигнал.

2. Регулируемая величина на выходе электропривода по возможности не должна зависеть от возмущающих воздействий на электропривод. Такими возмущающими воздействиями могут быть напряжение питания, температура, момент нагрузки, временные зависимости параметров и т.д.

Поэтому основным принципом управления является принцип обратной связи, позволяющий осуществить контроль качества регулирования по отклонению управляемого параметра от заданного. Каждый элемент функциональной схемы электропривода описывается в статике и динамике передаточной функцией.

В электроприводе в основном применяются три структуры построения систем уравнения:

1. С промежуточным суммирующим элементом;
2. С независимым регулированием параметров;
3. С подчиненным регулированием.

Из всех перечисленных способов построения преимущественное распространение получили системы с подчиненным регулированием. В них на вход каждого регулятора $W_{p1}(p) - W_{pn}(p)$ подается сигнал с предыдущего каскада (рис. 1.13), соответствующий задаваемому уровню регулируемой величины, и сигнал с выхода данного каскада, отвечающий фактическому уровню. Важным достоинством данной структуры является возможность простыми средствами осуществить ограничение любой из координат системы. Для этого достаточно ограничить задание данной координаты.

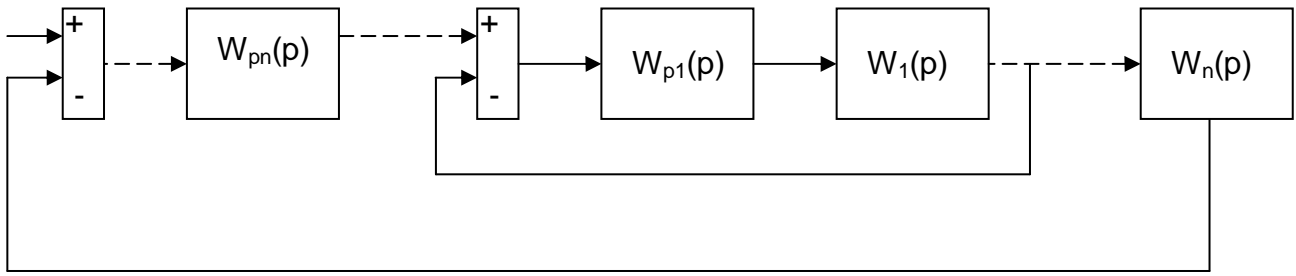


Рис. 1.13 – Структура схемы подчиненного электропривода

Рассмотрим последовательный синтез регуляторов, начиная с внутреннего контура, который принимаем за первый.

Передаточная функция регулятора подбирается так, чтобы при его включении последовательно с соответствующим звеном системы $W_1(p) - W_n(p)$ была скомпенсирована большая постоянная времени T и взамен ее действовала существенно меньшая постоянная времени T_0 .

В системах подчиненного регулирования используются регуляторы четырех типов:

- пропорциональные (П) с передаточной функцией $W_p(p) = k_{\Pi}$;

- интегральные (И), $W_p(p) = \frac{1}{T_0 p} = \frac{\kappa_{\Pi}}{p}$;

- пропорционально-интегральные (ПИ),

$$W_p(p) = \frac{1 + T_1 p}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1}{T_0} = \frac{\kappa_{\Pi}}{p} + \kappa_{\Pi};$$

- пропорционально-интегро-дифференциальные,

$$W(p) = \frac{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1 + T_2}{T_0} + \frac{T_1 T_2}{T_0} p = \frac{\kappa_{\Pi}}{p} + \kappa_{\Pi} + \kappa_{\Delta} p.$$

В приведенных выше выражениях:

$$\kappa_{\Pi} = \frac{1}{T_0}, \kappa_{\Pi} = \frac{T_1 + T_2}{T_0}, \kappa_{\Delta} = \frac{T_1 T_2}{T_0} \quad - \quad \text{коэффициенты усиления интегрального,}$$

пропорционального и дифференциального регуляторов соответственно.

Литература: [1, с.41-161; 3, с. 48-176].

Вопросы для контроля знаний

1. Основным элементом функциональной схемы системы АЭП является:

- 1) командный орган;
- 2) управляемый преобразователь;
- 3) автоматическое управляющее устройство;
- 4) электрический двигатель;
- 5) датчик регулируемой величины.

2. Принципы построения систем управления АЭП отличаются:

- 1) традициями ведущих электротехнических компаний;
- 2) количеством используемых каналов информации;
- 3) использованием аналоговым или дискретных сигналов;
- 4) количеством контролируемых возмущений.

3. Применение разомкнутых систем возможно, когда:

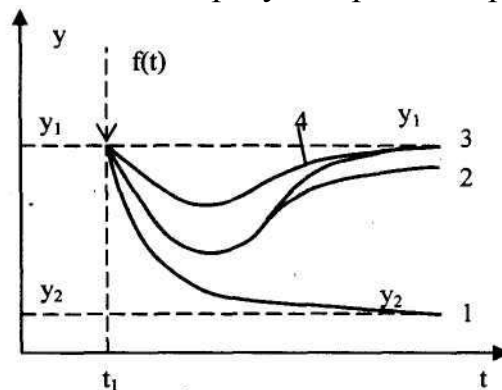
- 1) ошибка управления не приводит к существенным потерям технологии;
- 2) электропривод технологической машины управляется оператором;
- 3) отсутствуют требования к регулированию скорости двигателя;
- 4) используется релейно-контакторная схема управления.

4. Принцип замкнутого управления для построения системы АЭП выбирают на основании:

- 1) требований заказчика;
- 2) требований к величине ошибки управления;
- 3) требований к регулированию скорости;
- 4) требований к надежности.

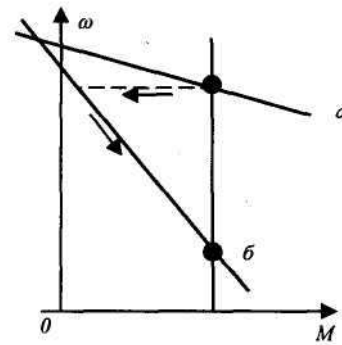
5. При появлении в момент времени t_1 возмущающего воздействия $f(t)$ регулируемая величина Y будет изменяться во времени в замкнутой системе с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором по кривой:

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) не будет изменяться.



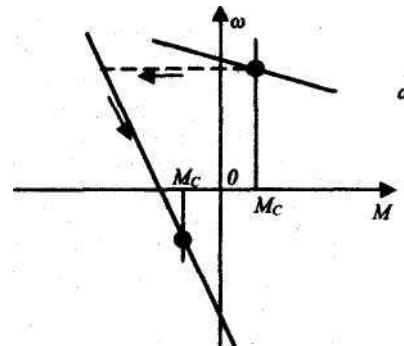
6. При переключении двигателя с характеристиками a на характеристику b он тормозится работая:

- 1) в двигательном режиме;
- 2) в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть;
- 3) в режиме динамического торможения.



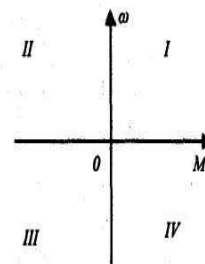
7. Если двигатель постоянного тока с реактивным моментом сопротивления M_c на валу реверсируется, то при скорости равной нулю абсолютное значение ускорения:

- 1) остается неизменным;
- 2) увеличивается скачком;
- 3) уменьшается скачком.



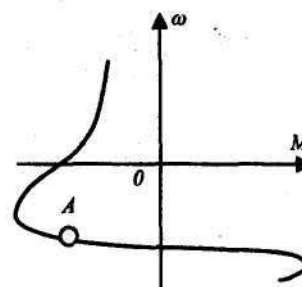
8. В каких квадратах плоскости ω, M изображаются механические характеристики для режима динамического торможения:

- 1) I-II;
- 2) I-III;
- 3) II-IV;
- 4) III-IV;
- 5) IV-I;



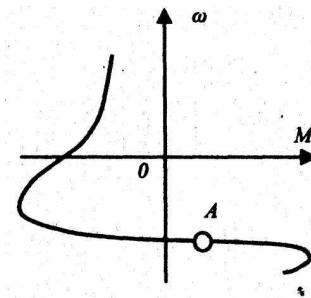
9. В точке А асинхронный двигатель работает

- 1) в двигательном режиме;
- 2) в режиме противовключения;
- 3) в режиме электрического торможения.



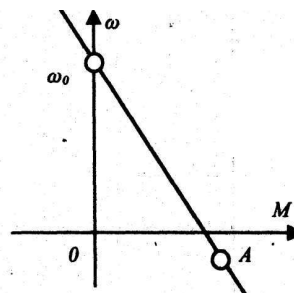
10. Асинхронный двигатель, работающий в точке А:

- 1) отдает электроэнергию в сеть;
- 2) потребляет электрическую энергию из сети и преобразует ее в механическую;
- 3) потребляет электроэнергию из сети и расходует ее на нагрев.



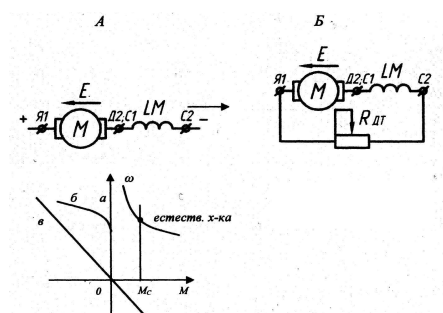
11. При работе двигателя в точке А справедливо соотношение:

- 1) $U - E = IR$;
- 2) $U + E = IR$;
- 3) $-U + E = IR$.



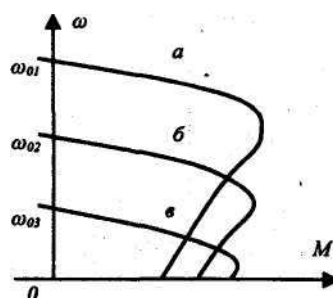
12. При переходе от схемы А к схеме В двигатель тормозится по характеристике:

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в.



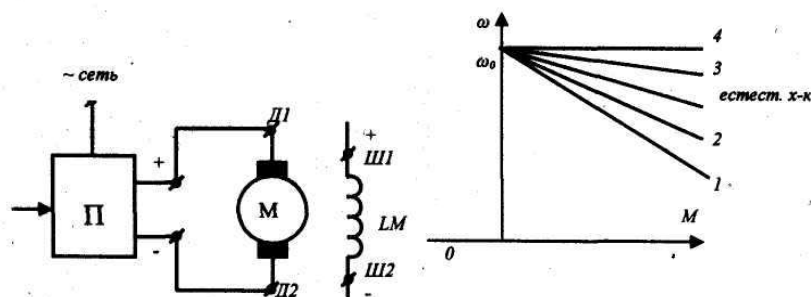
13. Какая характеристика асинхронного двигателя соответствует наибольшей частоте питающего напряжения:

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в.



14. Механическая характеристика ДПТ НВ в разомкнутой системе управляемый преобразователь-двигатель (П-Д) будет иметь вид:

- 1) прямой 1;
- 2) прямой 2;
- 3) естественной характеристики;
- 4) прямой 3;
- 5) прямой 4.



15. Механическая характеристика ДПТ НВ в системе П-Д с обратной связью по напряжению преобразователя и пропорционально-интегральном регуляторе напряжения будет иметь вид:

- 1) прямой 1;
- 2) прямой 2;
- 3) естественной характеристики;
- 4) прямой 3;
- 5) прямой 4.

16. Механическая характеристика ДПТ НВ в системе П-Д с обратной связью по скорости двигателя и пропорциональном регуляторе скорости будет иметь вид:

- 1) прямой 1;
- 2) прямой 2;
- 3) естественной характеристики;
- 4) прямой 3;
- 5) прямой 4.

17. Количество замкнутых контуров в системе подчиненного регулирования определяется:

- 1) требованием заказчика;
- 2) числом больших постоянных времени в составе объекта управления;
- 3) сложностью наладки системы.

18. Защита двигателей в системе П-Д, построенной по принципу подчиненного регулирования, в режиме работы «на упор» осуществляется:

- 1) применением задержанной обратной связи по току якоря;
- 2) регулированием тока якоря в замкнутом контуре;
- 3) включением в цепь протекания тока якоря дополнительного сопротивления.

Содержательный модуль 2.

Электрические расчеты и анализ типовых узлов автоматического управления пуском и торможением двигателей

Учебный элемент 2.1.

Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей

Наибольшее распространение во всех отраслях промышленности получили электроприводы, обеспечивающие автоматическое управление процессами пуска, торможения и реверса двигателей. Их долевое участие в общем количестве используемых в Украине электроприводов превышает 80%. В таких системах применяют контактные и бесконтактные электрические аппараты релейного действия. В силовых цепях, которые питают обмотки двигателей, используются электромагнитные контакторы переменного и постоянного тока, электромагнитные пускатели, тиристорные переключатели. В цепях управления различные реле времени, напряжения, тока, частоты, мощности и др. Команды на выполнение той или иной операции подаются с помощью кнопочных постов управления и т.п. Кроме этого сигналы на пуск, остановку, реверсирование или изменение скорости двигателя могут поступить в систему управления от путевых или конечных выключателей, датчиков давления, температуры и других датчиков, контролирующих работу технологических машин.

В рассматриваемой группе электроприводов автоматизация процесса пуска наиболее просто осуществляется для АД с короткозамкнутым ротором: после подачи команды на пуск операции управления сводятся к включению обмоток двигателя на полное напряжение сети, т.е. к прямому пуску двигателя. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели большой мощности (больше 100кВт) запускаются при пониженном напряжении.

При пуске ДПТ и АД с фазным ротором автоматически выключаются ступени пускового реостата из цепи протекания тока якоря или ротора соответственно.

Автоматизация процесса торможения работающего двигателя при любом виде электрического торможения предусматривает выполнение двух основных операций управления: 1 – после подачи команды на торможение совершаются переключения в силовых цепях двигателя, приводящие к изменению направления вращающего момента двигателя, т.е. делающие его тормозным; 2 – в конце торможения при скорости близкой к нулю, двигатель, тормозящийся для остановки, отключается от сети и затормаживается механическим тормозом. В другом случае в главных цепях производится переключения, необходимые для реверса двигателя, т.е. для разгона его в противоположном направлении.

Системы автоматического управления пуском, торможением и реверсом, реализующие указанные выше операции, конструктивно выполняют в виде комплектных стандартизованных устройств – станций управления. Кроме названного, станции управления обеспечивают возможность регулирования скорости двигателя, т.е. различные по величине скорости установившегося режима работы двигателя. На станциях управления устанавливаются аппараты электрической защиты главных цепей и цепей управления двигателем. Командоаппараты, пускорегулировочные и тормозные резисторы, токоограничивающие реакторы и другие элементы располагают чаще всего вне станций управления.

У электрических аппаратов станций управления предусмотрены запасные контакты, которые могут быть использованы для сигнализации и различных блокировок. Возможно также подключение в цепи управления станций контактов конечных выключателей, технологических датчиков и аппаратов других автоматических устройств.

В электрических схемах станций управления широко применяются типовые узлы управления и защиты. Принципы построения типовых узлов

рассмотрим на примере реостатного пуска ДПТ с независимым возбуждением с двумя ступенями пускового сопротивления. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.1а, диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_{\text{я}}$ – на рис.2.1б.

В первую очередь подключается к источнику напряжения U_B обмотка возбуждения LM. Ток возбуждения I_B , протекая по LM, создает магнитный поток Φ . После этого к источнику якорного напряжения U подключается якорная цепь двигателя.

При разомкнутых контактах контакторов ускорения КМ2 и КМ3 в момент времени $t=0$ замыкается контакт контактора линейного КМ1. Пусковой ток якоря $I_{\text{я1}}$ протекает по обеим ступеням пускового сопротивления $R_{\text{дп1}}$ и $R_{\text{дп2}}$. Если величина пускового сопротивления $R_{\text{п}}=R_{\text{дп1}}+R_{\text{дп2}}$ выбрана

правильно, то пусковой ток $I_{\text{я1}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{дп1}} + R_{\text{дп2}}}$ не будет превышать

допустимого значения $I_{\text{я1}} \leq I_{\text{я доп}} \leq 2,5 I_{\text{я н}}$. На якорь двигателя при скорости $\omega=0$ начинает действовать пусковой момент $M_{\text{п}}$. Если $M_{\text{п}}$ больше момента сопротивления $M_{\text{с}}$, момент динамический имеет положительную величину $M_{\text{д}} > 0$, то в соответствии с уравнением движения электропривода при пуске

$M_{\text{п}} - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}$, величина углового ускорения $\frac{d\omega}{dt}$ будет положительна и скорость вращения якоря двигателя ω будет возрастать.

В обмотке якоря двигателя, вращающейся в магнитном потоке Φ , будет находиться э.д.с. вращения $E=k\omega\Phi$. Как следует из схемы включения двигателя на рис. 2.1а, э.д.с. вращения E по отношению к источнику якорного напряжения U направлена встречно. Поэтому с увеличением ω будет

увеличиваться E и уменьшаться якорный ток $I_{\text{я1}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{дп1}} + R_{\text{дп2}}}$.

С уменьшением $I_{\text{я}}$ будет уменьшаться и вращающий момент двигателя $M=k\Phi I_{\text{я}}$. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению динамического момента

$M_D = M - M_c$ и ускорения $d\omega/dt$. Как следует из диаграммы на рис. 2.1б по истечении промежутка времени Δt_1 двигатель достиг скорости ω_1 , а якорный ток величины $I_{Я2}$. Вращающий момент двигателя M стал равным M_c , т.е. $M_D = 0$ и поэтому увеличение скорости вращения якоря двигателя прекратилось. Двигатель из переходного режима работы с $\frac{d\omega}{dt} > 0$ при $\omega = \omega_1$ перешел в установившийся режим с $\frac{d\omega}{dt} = 0$.

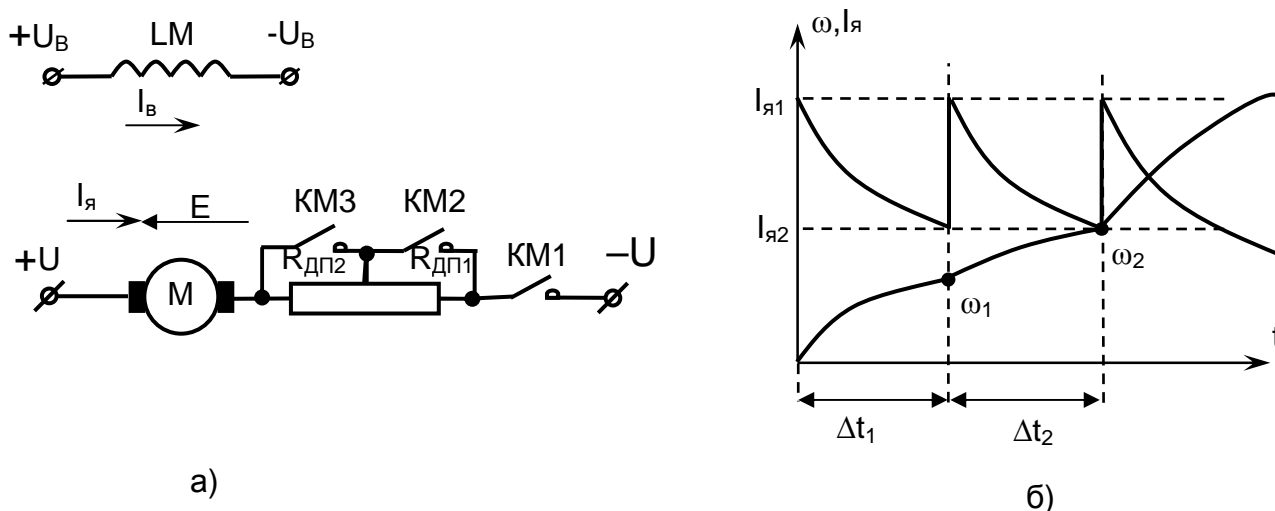


Рис. 2.1 – Реостатный пуск ДПТ НВ в две ступени:

а) схема включения двигателя;

б) диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_{Я}$

Для того, чтобы продолжить разгон, необходимо замкнуть контакт первого контактора ускорения $KM2$ и шунтировать первую ступень пускового сопротивления $R_{ДП1}$. При этом якорный ток практически мгновенно увеличится до значения $I_{Я1}$, что приведет к появлению положительного M_D и росту скорости. По истечении промежутка времени Δt_2 двигатель достигнет скорости ω_2 , а якорный ток уменьшится до величины $I_{Я2}$. Двигатель перейдет в установившийся режим работы со скоростью ω_2 . Для продолжения разгона необходимо замкнуть контакт второго контактора ускорения $KM3$ и шунтировать $R_{ДП2}$. Вновь увеличится $I_{Я}$, появится $M_D > 0$ и продолжится рост скорости, который прекратится при $M = M_c$.

Из графиков изменения во времени скорости и тока ДПТ при реостатном пуске с 2 ступенями пускового сопротивления видно, что автоматическое

выключение (шунтирование) ступеней пускового сопротивления может производиться: 1- через определенные промежутки времени (Δt_1 , Δt_2); 2- при определенных значениях скорости (ω_1 , ω_2); 3- при определенной величине тока $I_{я2}$.

Таким образом, автоматическое управление пуском, суть которого заключается в шунтировании ступеней пускового реостата, может быть осуществлено: 1 – в функции времени; 2 – в функции скорости; 3 – в функции тока якоря.

Управление в функции времени предполагает наличие в схеме автоматического управления реле времени, настраиваемых на отсчет заданных выдержек времени.

Управление в функции скорости производится при помощи реле, контролирующих скорость двигателя непосредственно или косвенно.

Управление в функции тока реализуется применением реле минимального тока. Все аппараты подают команды на включение контакторов ускорения.

Управление торможением может производиться в функции тех же самых величин и средств автоматизации, что и при пуске.

Все сказанное справедливо для ДПТ с последовательным возбуждением и АД с фазным ротором.

Учебный элемент 2.2.

Типовые узлы схем автоматического управления пуском ДПТ

Каждый из принципов автоматического управления пуском и торможением реализуется в схемах электроприводов типовыми узлами. Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск в функции времени ДПТ с независимым и последовательным возбуждением с двумя ступенями пускового сопротивления $R_{дп1}$ и $R_{дп2}$ приведен на рис. 2.2. Механические характеристики двигателей, соответствующие схеме включения на рис. 2.2, приведены на рис. 2.3.

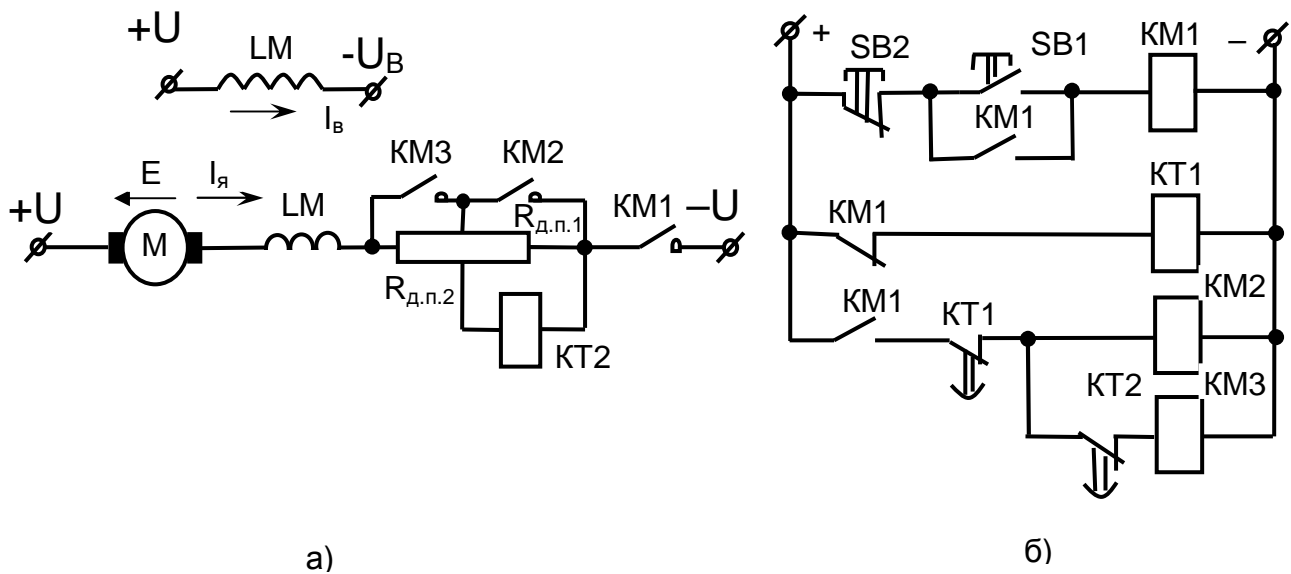


Рис. 2.2 – Типовой узел управления пуском ДПТ в функции времени:
а) главные цепи; б) цепи управления

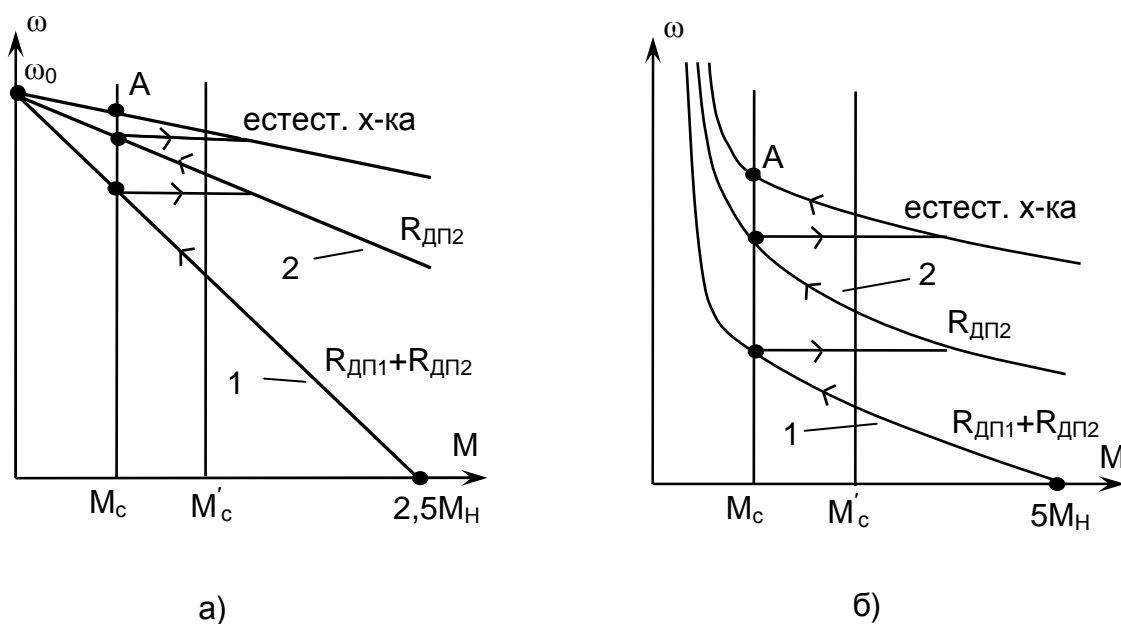


Рис. 2.3 – Механические характеристики двигателя при пуске:

а) механические характеристики ДПТ НВ;
б) механические характеристики ДПТ ПВ

При подаче напряжения на главные цепи и цепи управления включается электромагнитное реле времени первой ступени КТ1 и, размыкая свой контакт, исключает возможность включения контакторов ускорения КМ2 и КМ3.

При нажатии на кнопку SB1 включается контактор КМ1, который своим главным контактом подключает к напряжению якорную цепь двигателя, замыкающими контактами шунтирует SB1 (КМ1 становится на самопитание) и подготавливает цепь включения КМ2, КМ3, а размыкающим контактом разрывает цепь питания катушки реле КТ1 и реле начинает отсчет выдержки времени. Двигатель начинает разгоняться по реостатной механической характеристике 1. При протекании пускового тока по $R_{дп1}$ срабатывает реле времени второй ступени КТ2, т.к. падение напряжения от пускового тока на $R_{дп1}$ велико. Контакт реле КТ2 размыкается в цепи питания катушки контактора КМ3. Реле времени КТ1 по истечении заданной выдержки времени отключается и замыкает свой контакт. Получает питание катушка КМ2. Контактор КМ2 включается и закорачивает $R_{дп1}$. Двигатель переходит на механическую реостатную характеристику 2. Катушка реле КТ2 теряет питание. Реле КТ2 отсчитав заданную выдержку времени отключается и замыкает свой контакт. Включается КМ3, закорачивает $R_{дп2}$ и двигатель переходит на естественную характеристику. Достоинством управления в функции времени является простота и надежность реле времени, удобство регулировки их уставок, применение одноступенчатых реле для двигателей различной мощности. Кроме того, при увеличении M_c до величины M_c' и той же выдержке времени реле РУ1 двигатель на первой характеристике разгонится до меньшей скорости, но бросок момента при переключении будет большим. Поэтому средний динамический момент при пуске останется приблизительно тем же и время пуска почти не изменится. При управлении в функции времени в отличие от управления в функции скорости или тока, отсутствует опасность «застревания» двигателя на первой характеристике при $M_c' > M_c$. Все это обусловило широкое распространение управления в функции времени.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции скорости в две ступени, механические характеристики двигателя и диаграмма напряжения на зажимах якоря двигателя приведены на рис. 2.4.

Катушки реле напряжения KV1 и KV2 включены на зажимы якоря двигателя. Напряжение на зажимах якоря $U_{\text{я}}$ отличается от E только на небольшое по величине падения напряжение от тока якоря на якорном сопротивлении $I_{\text{я}} \cdot R_{\text{яц}}$. Следовательно KV1 и KV2 являются аппаратами, контролирующими э.д.с. вращения двигателя. Поскольку э.д.с. при постоянном магнитном потоке пропорциональна скорости вращения двигателя $E = k\Phi_n\omega$, то рассматриваемый узел осуществляет управление пуском в функции скорости при ее косвенном контроле.

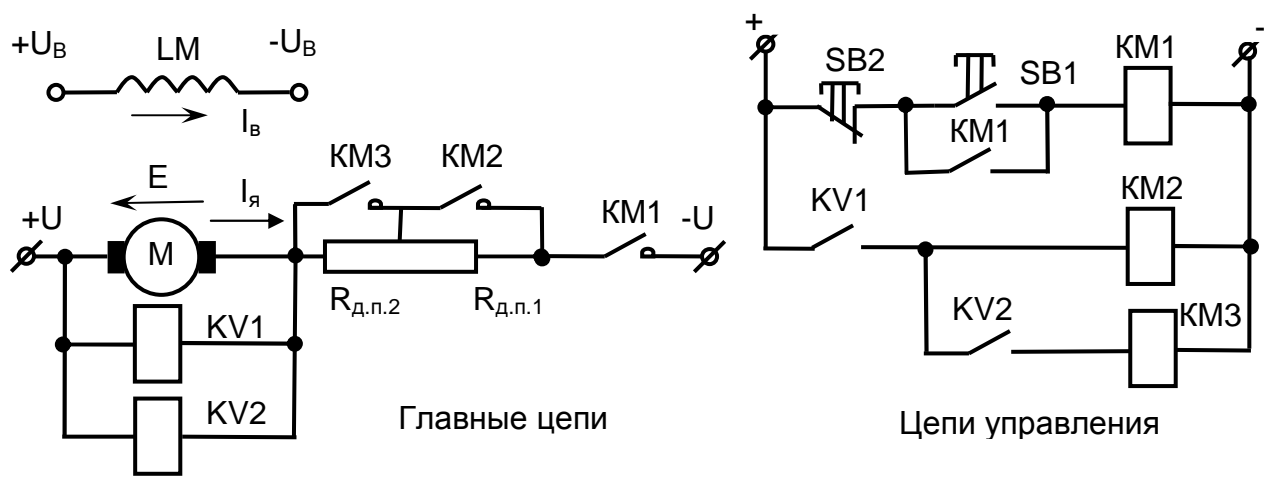
При нажатии на SB1 включается KM1. Напряжение на катушках KV1 и KV2 мало и равно падению напряжения на якорном сопротивлении броска пускового тока $I_{\text{п}} R_{\text{яц}}$. Поэтому KV1 и KV2 не срабатывают. Контактors KM2 и KM3 отключены и в цепь якоря введено $R_{\text{дп1}} + R_{\text{дп2}}$. Двигатель запускается по характеристике 1. По мере увеличения скорости двигателя возрастает E и $U_{\text{я}}$.

При $U_{\text{я1}} = U_{\text{ср. KV1}}$ включается KV1 и включает KM2, который своим главным контактом закорачивает первую ступень сопротивления $R_{\text{дп1}}$. Двигатель переходит на характеристику 2. Скорость двигателя продолжает расти, поэтому возрастает и э.д.с. При $U_{\text{я2}} = U_{\text{ср. KV2}}$ включается KV2 и включает контактор KM3. Шунтируется вторая ступень сопротивления $R_{\text{дп2}}$ и двигатель выходит на естественную характеристику. Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции тока якоря $I_{\text{я}}$ приведен на рис. 2.5.

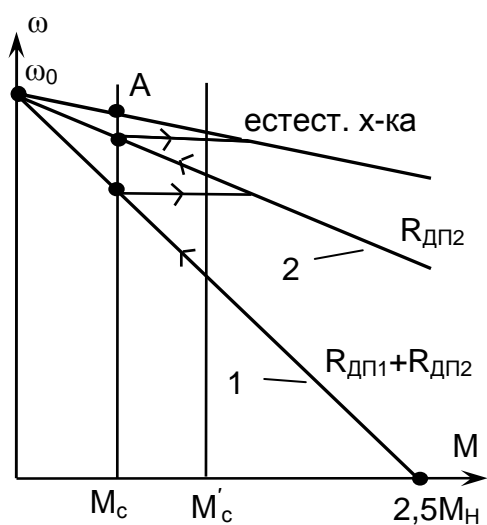
Он применяется при разгоне двигателя до скорости выше основной путем ослабления магнитного потока. Это позволяет расширить диапазон регулирования скорости. На рисунке не показаны цепи управления контакторами KM1, KM2, KM3. Пуск до основной скорости может осуществляться одним из рассмотренных выше способов. Контроль $I_{\text{я}}$ осуществляется токовым реле КА.

Работа типового узла начитается после включения контактора KM3 при выходе двигателя на естественную характеристику. При замыкании главного контакта KM3 от броска $I_{\text{я}}$ срабатывает реле КА и замыкает свой контакт,

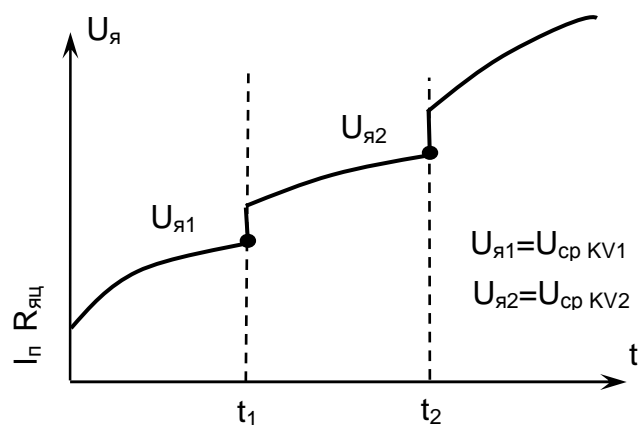
шунтирующий реостат возбуждения $R_{ДВ}$. До этого он был шунтирован размыкающим контактом КМЗ. Следовательно магнитный поток двигателя Φ сохраняется равным Φ_H и двигатель продолжает разгон по естественной характеристике. Ток якоря уменьшится, когда $I_{я}$ снизится до величины тока отключения КА $I_{возв\ KA}$, реле отключается, размыкает свой контакт и последовательно с ЛМ вводится $R_{ДВ}$. Происходит ослабление потока Φ и рост скорости ω . При этом ток якоря увеличивается и, когда он достигнет значения тока включения КА $I_{сраб\ KA}$, реле включится, контакт замкнется. Начинается усиление Φ и снижение $I_{я}$. Скорость M будет продолжать расти, т.к. за счет увеличения $I_{я}$ вращающий момент двигателя будет больше момента сопротивления $M > M_c$. При спадании $I_{я}$ до величины $I_{возв\ KA}$ реле вновь разомкнет свой контакт, что повлечет за собой ослабление Φ и т.д. Реле КА срабатывает несколько раз, прежде чем двигатель достигнет скорости, заданной положением ползунка реостата $R_{ДВ}$.



а)



б)



в)

Рис. 2.4 – Типовой узел управления пуском ДПТ НВ в функции скорости:

- а) схема включения двигателя;
- б) механические характеристики двигателя;
- в) диаграмма напряжения на зажимах якоря

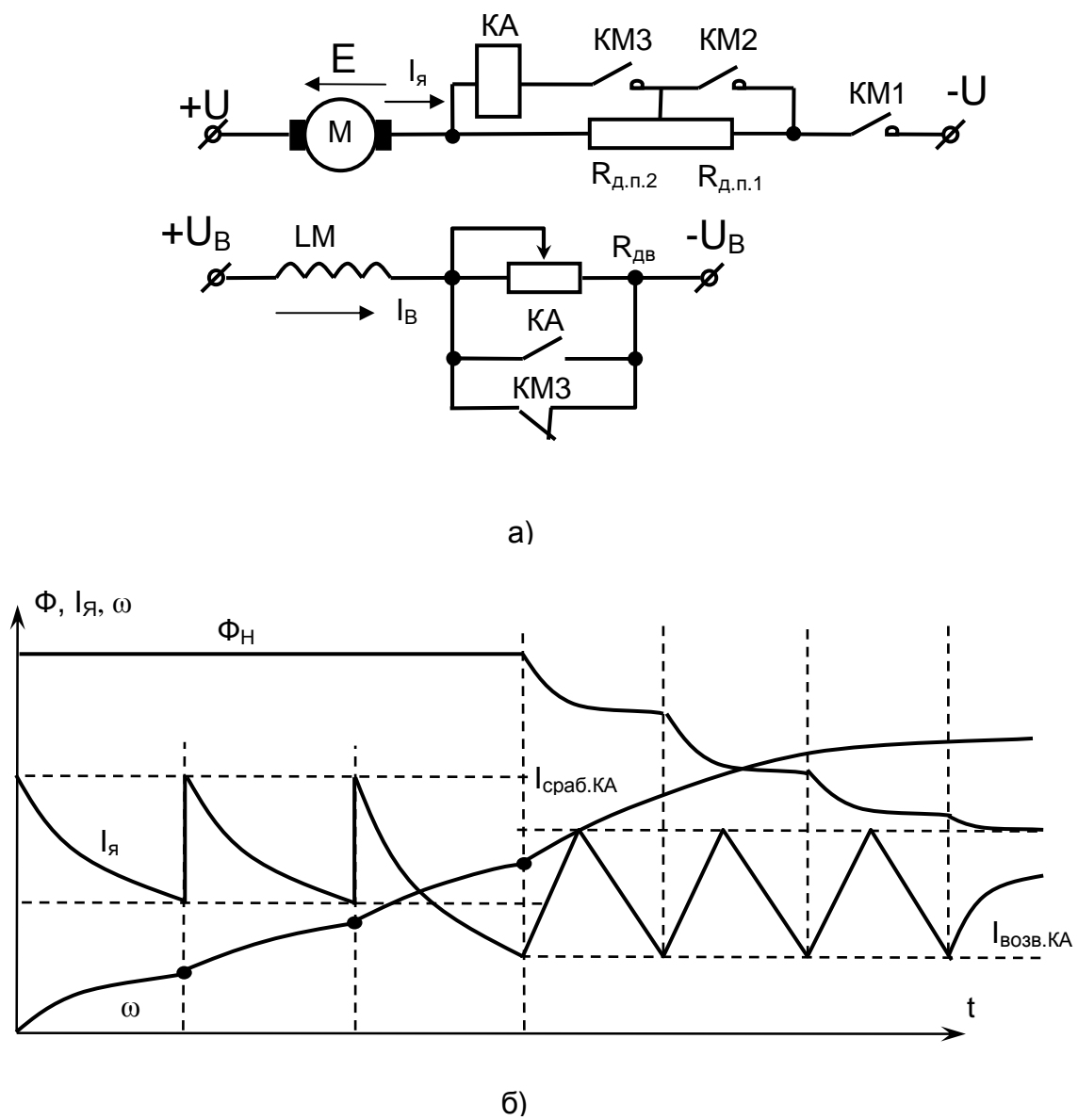


Рис. 2.5 – Типовой узел управления пуском ДПТ НВ в функции тока якоря:

а) схема включения двигателя; б) диаграмма Φ, I_a, ω

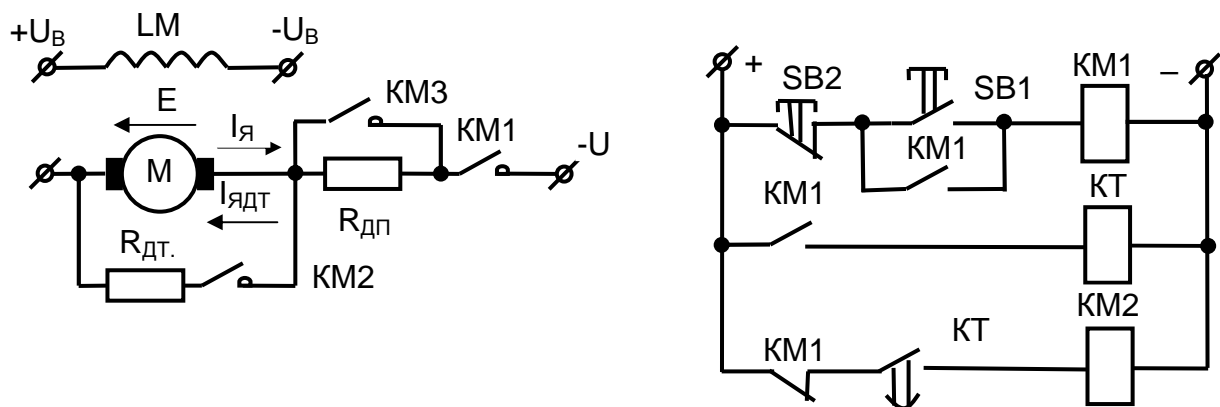
Учебный элемент 2.3.

Типовые узлы схем автоматического управления торможением ДПТ

Управление торможением двигателей производится в функции времени, скорости или тока с применением тех же технических средств, что и при пуске. Автоматизация процесса торможения при любом его виде предусматривает выполнение двух основных операций:

1) после подачи команды на торможение в силовых цепях работающего двигателя производятся переключения, в результате которых изменяется направление момента двигателя;

2) в конце торможения при скорости близкой к нулю, двигатель автоматически отключается от сети, либо в силовых цепях производятся переключения, необходимые для реверса.



а)

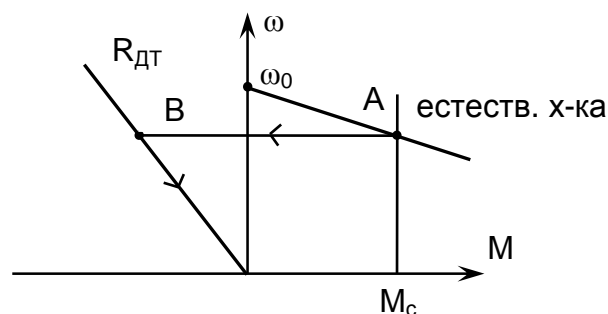


Рис. 2.6 – Типовой узел управление динамическим торможением ДПТ НВ в функции времени:

а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением в функции времени приведен на рис. 2.6. Пуск двигателя показан условно в одну ступень. Управление КМ3 при пуске может осуществляться одним из ранее рассмотренных методов. По окончании пуска двигатель работает в точке А на естественной характеристике. Направление э.д.с. вращения E и тока якоря $I_{\text{я}}$ на рис. 2.6.а показано для двигательного режима работы.

При пуске замыкающий контакт КМ1 подает питание на катушку реле динамического торможения КТ и реле срабатывает. Замыкающий контакт КТ в цепи питания катушки контактора динамического торможения КМ2 замкнется. Однако КМ2 не включится, т.к. в цепи питания его катушки разомкнут контакт КМ1.

При нажатии на кнопку «стоп» SB2 отключится контактор КМ1 и якорная цепь двигателя будет отключена от источника якорного напряжения U . Потеряет питание катушка реле КТ. Однако реле КТ, электромагнитное реле времени, останется во включенном состоянии и будет вести отсчеты выдержки времени. Включится контактор КМ2 и к зажимам якоря двигателя будет подключено сопротивление динамического торможения $R_{\text{дт}}$. В образовавшемся контуре под действием э.д.с. вращения E будет протекать ток динамического торможения $I_{\text{я дт}}$, направленный встречно к току двигательного режима $I_{\text{я}}$. Поэтому изменит направление и станет тормозным вращающий момент двигателя. Двигатель из точки А перейдет в точку В на характеристике динамического торможения и его скорость будет снижаться. По окончании отсчета выдержки времени реле КТ отключится, разомкнет свой контакт в цепи питания катушки КМ2 и отключит его.

Управление торможением в функции времени применяется только при реактивном M_c . Уставка КТ должна быть равной или немного большей времени торможения. При активном M_c его увеличение уменьшает действительное время торможения. За время уставки реле КТ. Двигатель останавливается и под действием активного M_c начинает разгон в противоположном направлении.

Автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением при активном M_c осуществляется в функции скорости при ее прямом или косвенном контроле. Схема типового узла приведена на рис. 2.7.

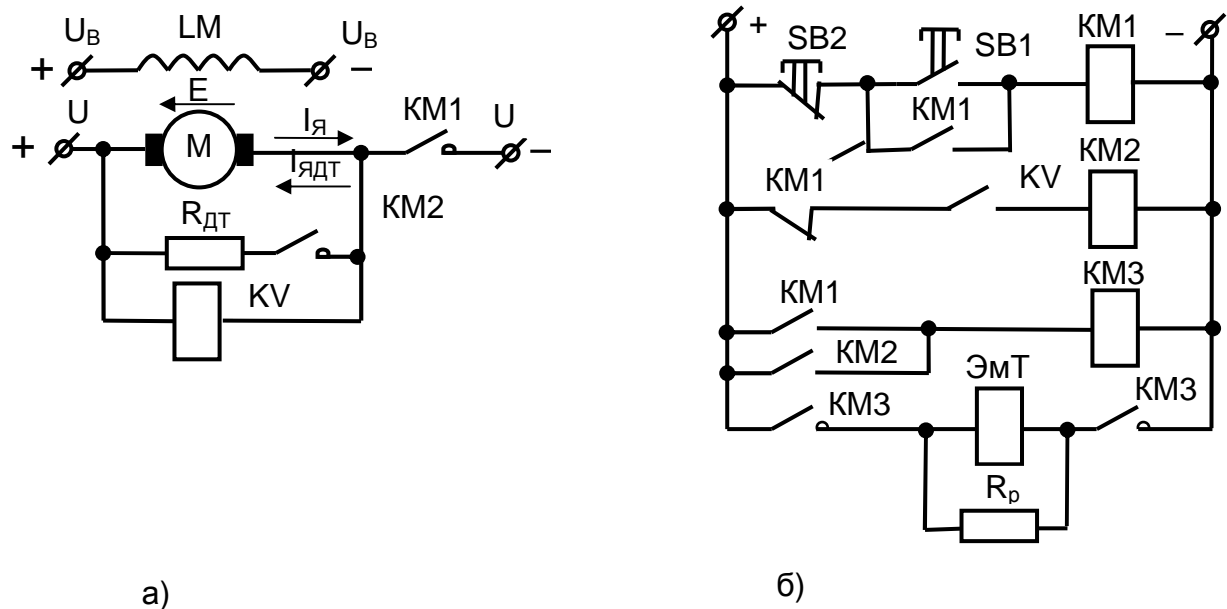


Рис. 2.7 – Типовой узел управления динамическим торможением ДПТ НВ в функции скорости:

а) главные цепи; б) цепи управления

Скорость двигателя определяется косвенно по величине э.д.с. вращения E . Контроль э.д.с. осуществляет реле напряжения KV . Катушка KV включена на зажимы якоря двигателя. Пусковые сопротивления и контакторы ускорения на схеме не показаны. Реле KV срабатывает во время пуска при $U_{я}=0,6 \div 0,7 U_H$. При отключении $KM1$ включается $KM2$. На зажимы якоря подключается $R_{ДТ}$ и двигатель тормозится. Когда скорость станет достаточно малой, KV отключится и отключит $KM2$. Вал двигателя свободен, когда электромагнит механического тормоза $ЭмТ$ получает питание. Поэтому тормозной контактор $KM3$ включен как в двигательном режиме, так и в режиме электрического торможения.

При реверсивной схеме включения ДПТ с независимым или последовательным возбуждением автоматическое управление процессом торможения противовключением осуществляется в функции скорости при косвенном контроле ее величины по э.д.с. вращения двигателя. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.8а. На ней показаны обмотки независимого L1M и последовательного L1M возбуждения. Механические характеристики, соответствующие схеме включения ДПТ НВ, приведены на рис. 2.8б, а схема цепей управления на рис. 2.8в. В ней используется не кнопочное, а более удобное командоконтроллерное управление. Вертикальные штриховые линии означают фиксированные положения рукоятки командоконтроллера (КК). В данном случае их три: 0 – нулевое (среднее) положение; В – вперед; Н – назад. Точка на штриховой линии под контактом означает, что контакт в данном положении замкнут. В нашем случае контакты командоконтроллера К1 и К2 в нулевом положении рукоятки разомкнуты; в положении «вперед» замкнут К1, а К2 разомкнут; в положении «назад» - наоборот.

Пуск двигателя показан условно в одну ступень в функции времени. Для пуска двигателя в направлении «вперед» необходимо перевести рукоятку командоконтроллера из положения «0» в положение «В». Замкнется контакт К1 командоконтроллера и получит питание катушка контактора «вперед» КМ1. Контактор КМ1 срабатывает и своими главными контактами подключает якорь двигателя к источнику напряжения U . Катушки контакторов противовключения КМ3 и ускорения КМ4 питания не получают, контакторы отключены и их главные контакты разомкнуты. Пусковой ток протекает по $R_{дп}$ и $R_{дпр}$. Поэтому двигатель начинает разгон по характеристике противовключения в I квадранте. Появляется падение напряжения от пускового тока на $R_{дпр}$ и поэтому получает питание катушка реле КТ. Реле ускорения КТ включится и разомкнет свой контакт в цепи питания катушки КМ4.

Замыкающий контакт КМ1 подает питание на катушку реле противовключения «вперед» КV1. Реле КV1 срабатывает и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КМ3. Контактор КМ3 срабатывает и своим главным

контактом шунтирует $R_{ДПР}$. Двигатель с характеристики противовключения переходит на пусковую характеристику. Одновременно с этим теряет питание катушка КТ и реле начинает отсчет выдержки времени. По окончании выдержки времени реле КТ отключится, его контакт в цепи питания катушки КМ4 замкнется и контактор ускорения КМ4 сработает. Главный контакт КМ4 замкнется и зашунтирует $R_{ДП}$. Двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке А.

Для перевода двигателя в режим торможения противовключением необходимо рукоятку командоконтроллера из положения «В» перевести в положение «Н». При переходе рукоятки через положение «0» оба контакта командоконтроллера оказываются разомкнутыми, поэтому катушки КМ1, КМ3, КМ4 теряют питание и контакторы отключаются. В цепь протекания якорного тока включаются $R_{ДП}$ и $R_{ДПР}$, т.е. двигатель подготавливается к режиму торможения противовключением. В положении рукоятки «Н» замыкается контакт К2. Получает питание катушка контактора «назад» КМ2 и контактор КМ2 срабатывает. Главные контакты КМ2 замыкаются и изменяют полярность напряжения на зажимах якоря двигателя. Изменяется направление якорного тока и вращающего момента двигателя. Он становится тормозным. Двигатель из точки А переходит в точку В на характеристике торможения противовключением. Замыкающий контакт КМ2 в цепи питания катушки реле противовключения «назад» КV2 замкнется, однако реле КV2 не включится. Это обеспечивается подключением правого по схеме вывода катушки КV2, т.е. величиной R_{xx} . Катушки КМ3 и КМ4 питание не получают, контакторы отключены и двигатель тормозится по характеристике противовключения. Реле КТ включено и его контакт в цепи питания катушки КМ4 разомкнут.

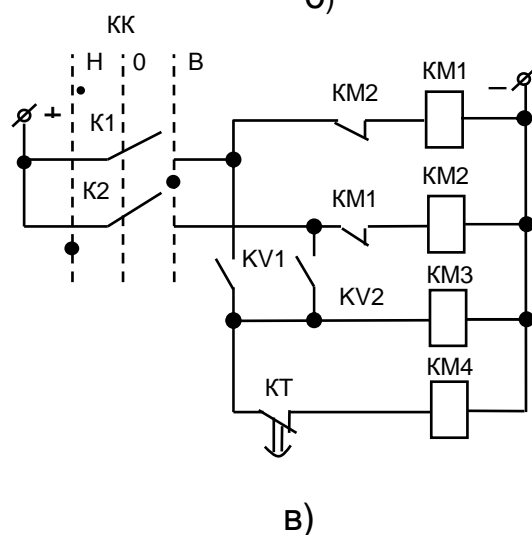
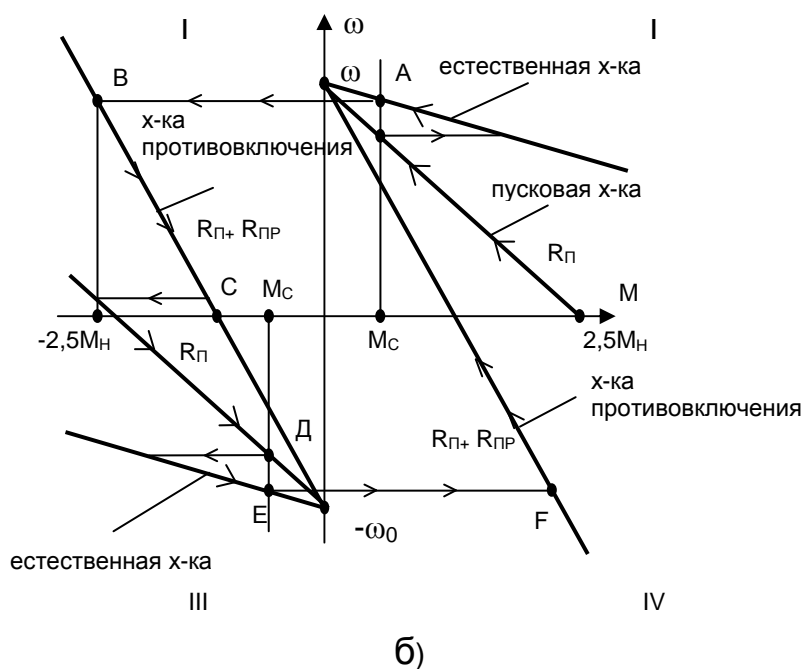
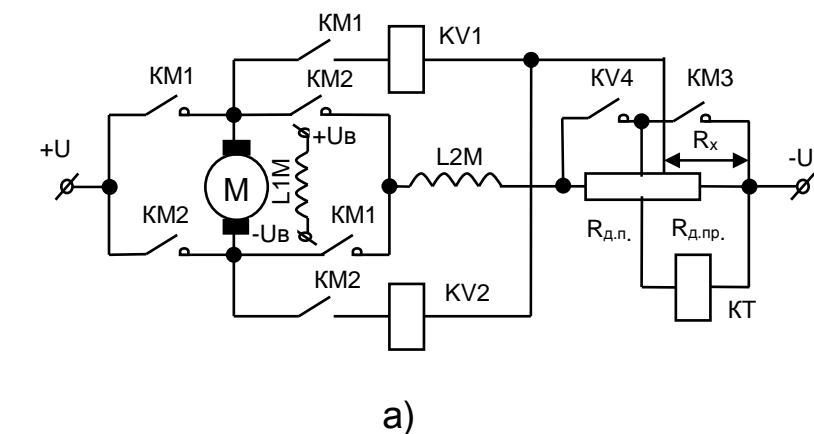


Рис. 2.8 – Типовой узел управления торможением
противовключением ДПТ:

а) реверсивная схема включения ДПТ; б) механические характеристики
ДПТ с независимым возбуждением; в) схема цепей управления

С уменьшением скорости двигателя напряжение на катушке KV2 увеличивается. При скорости, близкой к нулю, KV2 включится и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КМ3. Контакт КМ3 сработает и своим главным контактом зашунтирует $R_{дпр}$. Двигатель перейдет на пусковую характеристику. Потеряет питание катушка КТ и реле начнет отсчет выдержки времени. Двигатель по пусковой характеристике затормозится и сразу же начнет разгон в направлении «назад». По окончании выдержки времени КТ отключится и включит КМ4. Главный контакт КМ4 зашунтирует $R_{дп}$, двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке Е. Для ДПТ с последовательным возбуждением процессы аналогичны.

Учебный элемент 2.4.

Типовые узлы схем автоматического управления пуском и торможением двигателей переменного тока

Графики изменения во времени скорости и тока двигателя при пуске на рис. 2.1.б, построенные для ДПТ НВ справедливы и для АД с фазным ротором, т.к. рабочая часть механической характеристики АД линейна как и механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением. С ростом сопротивления в цепи ротора наклон рабочей части характеристик к оси абсцисс увеличивается. Поэтому автоматическое управление пуском и торможением АД с фазным ротором осуществляется в функции тех же величин, что и ДПТ.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск АД с фазным ротором в две ступени в функции времени, приведен на рис. 2.9.

Цепи управления питаются от сети постоянного тока. При большой частоте включения двигателя используют контакторы переменного тока с катушками постоянного тока и электромагнитные реле времени, электрические аппараты постоянного тока. Схема отличается от схемы управления пуском ДПТ лишь тем, что катушка реле времени КТ2 включена в цепь управления через размыкающий контакт КМ1. Таким образом КТ2 включается при подаче напряжения на схему, а отсчёт выдержки времени КТ2 начинается с момента размыкания контакта контактора КМ2.

Для СД всегда применяют асинхронный пуск. Поэтому в статорных цепях СД осуществляются так же переключения, как и при пуске АД: – статорные обмотки включаются на полное напряжение (прямой пуск) либо на пониженное напряжение с последующим переключением в функции времени на полное.

Специфическая особенность пуска СД – управления подачей в обмотку возбуждения постоянного тока от возбудителя. В качестве последних используют генераторы постоянного тока или тиристорные преобразователи. Для быстроходных СД вал возбудителя соединяют с валом двигателя, для

тихоходных СД привод возбудителя выполняют на основании АД с короткозамкнутым ротором.

Если позволяют питающая сеть и двигатель, то применяют прямой пуск с постоянно подключённым возбудителем при M_c на валу СД, не превышающем $0,4M_n$. Если $M_c > 0,4M_n$, то возбудитель подключается на подсинхронной скорости.

При пуске на пониженном напряжении различают: «лёгкий» пуск, при котором возбуждение подаётся до включения обмотки статора на полное напряжение (при небольшом M_c) и «тяжёлый» пуск – подача возбуждения происходит при полном напряжении на обмотке статора (при значительном M_c).

На рисунке 2.10.а – схема прямого пуска с наглухо подключённым возбудителем Г. Управление пуском состоит во включении линейного контактора КМ1. По мере разгона M напряжение Г растёт, растёт и ток возбуждения. При подсинхронной скорости он оказывается достаточным для вхождения M в синхронизм.

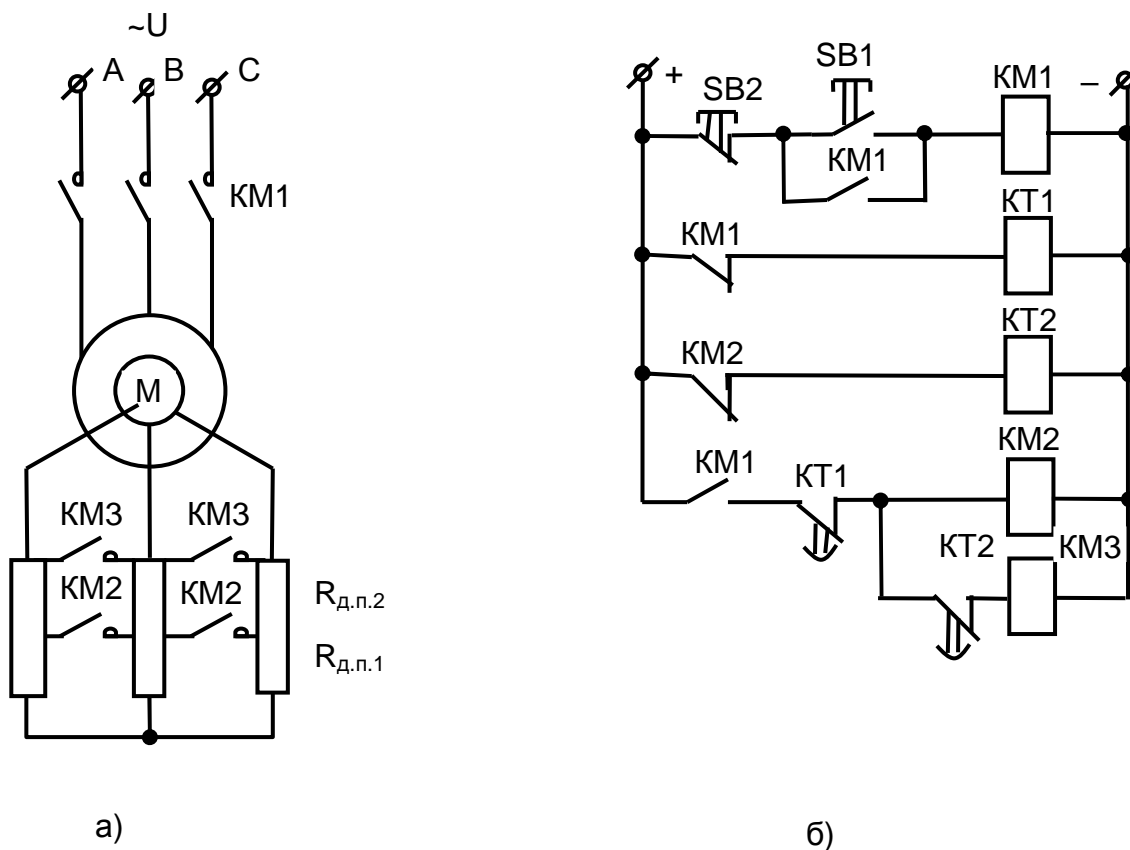


Рис. 2.9 – Типовой узел управления пуском:
а) главные цепи; б) цепи управления

Схемы на рис. 2.10.б и 2.10.в применяют при более тяжёлых условиях пуска. Начинается пуск с включения $KM1$. Обмотка возбуждения LM либо замкнута на разрядное сопротивление R_p , либо подключена к возбудителю последовательно с R_p . Подачей возбуждения можно управлять в функции скорости (скольжения) или тока статора M . Первый способ рис. 2.10.б. реализуют при помощи электромагнитного реле времени KT . Его катушка включена через диод $VД$ на часть R_p . При подключении обмотки статора M к сети в обмотке возбуждения наводится переменная э.д.с. По катушке KT начнёт протекать выпрямленный диодом ток $i_{кам}$, в виде импульсов, амплитуда и частота которых пропорциональны скольжению s . В самом начале пуска, когда $s=1$, амплитуды импульсов тока $i_{кам}$ достаточно велики, а временные интервалы между ними малы, поэтому KT включится. По мере разгона M амплитуда импульсов уменьшается, а временные интервалы между ними

увеличиваются. При подсинхронной скорости эти интервалы станут равными времени выдержки и КТ отключится. Его контакт замкнётся и включит КМ2. Из-за разброса выдержек КТ схема не обеспечивает чёткого вхождения M в синхронизм.

В основном применяют управление в функции тока статора M (рис. 2.10.в.). Токовое реле КА получает питание от трансформатора тока ТА, включённого в фазу статорной цепи. Известно, что при асинхронном пуске ток статора в зоне подсинхронной скорости резко уменьшится. Это обстоятельство и используют для фиксации момента подачи возбуждения. При нажатии на SB1 срабатывает КМ1. От броска пускового тока срабатывает и КА. Его размыкающий контакт в цепи катушки КМ2 размыкается, а замыкающий контакт включает блокировочное реле КV. Реле КV становится на самопитание и подготавливает цепь включения КМ2. На подсинхронной скорости ток статора снижается, КА отключается. Включается КМ2. Его контакты закорачивают R_p и катушку КА, чтобы реле не сработало от броска тока статора при вхождении M в синхронизм.

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением АД с фазным ротором в функции времени, приведен на рис. 2.11.

Узел применяется при отсутствии цепи постоянного тока. Две обмотки статора питаются через выпрямитель US. Управление пуском условно показано в одну ступень в функции времени. При работе M включены КМ1 и КМ2. Реле времени КТ2 также включено и его контакт в цепи катушки КМ3 замкнут. При нажатии на SB2 контакторы КМ1 и КМ2 отключаются. Статор отключается от сети. В ротор вводится $R_{дп}$. Замыкающий контакт SB2 включает КМ3, который своими главными контактами подключает две обмотки статора к выпрямителю US. Двигатель переходит в режим динамического торможения. Теряет питание катушка КТ2. После окончания выдержки времени размыкается замыкающий РДТ в цепи катушки КМ3 и КМ3 отключается. Торможение заканчивается.

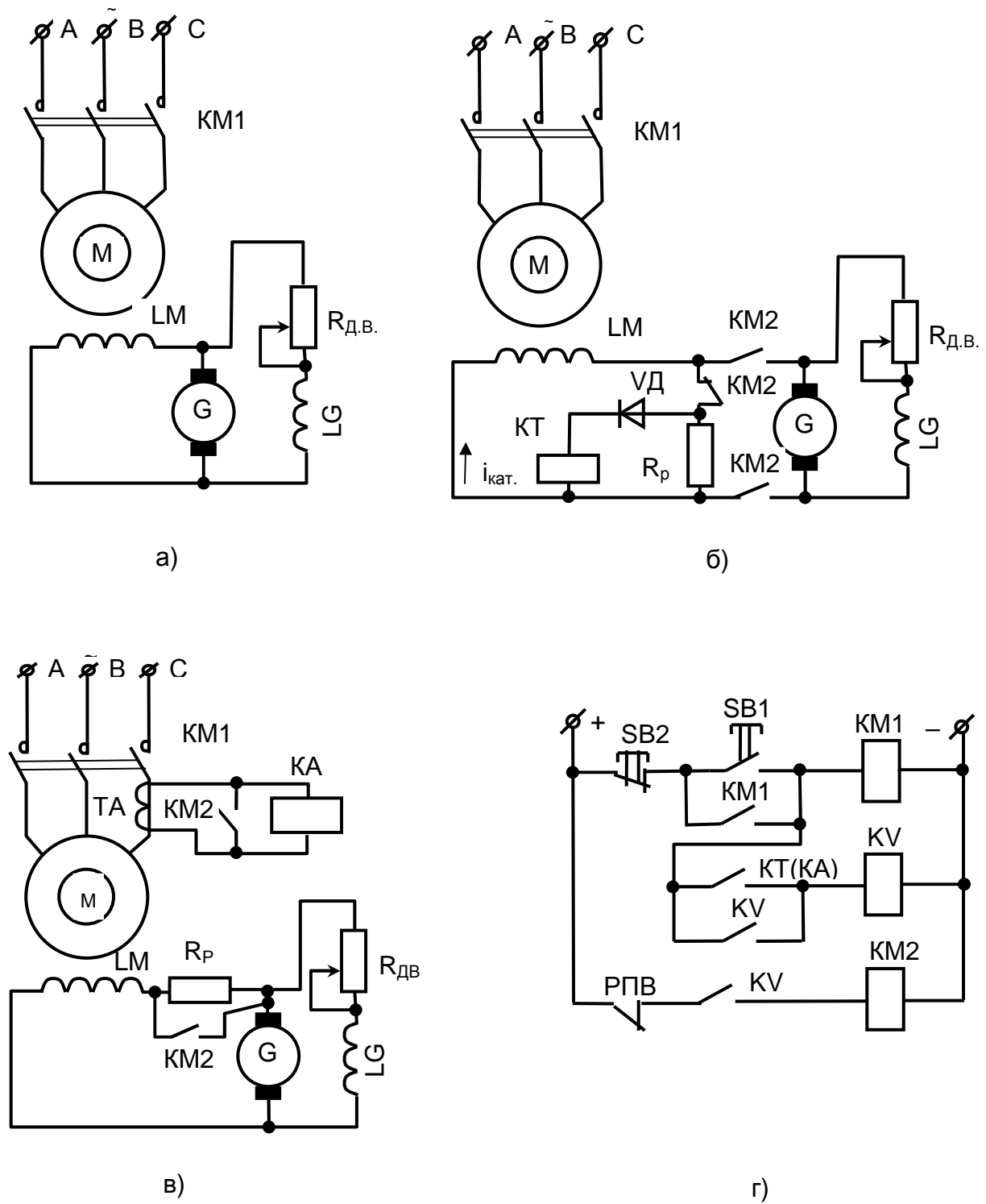


Рис. 2.10 – Типовые узлы автоматического управления пуском СД:

а) схема прямого пуска СД; б) схема пуска в функции скорости;
в) схема пуска в функции тока; г) схема цепей управления

Условия применения типового узла такие же, как и для ДПТ. При наличии сети постоянного тока обмотки статора питаются непосредственно от сети через добавочное сопротивление и два замыкающих главных контакта КМ3.

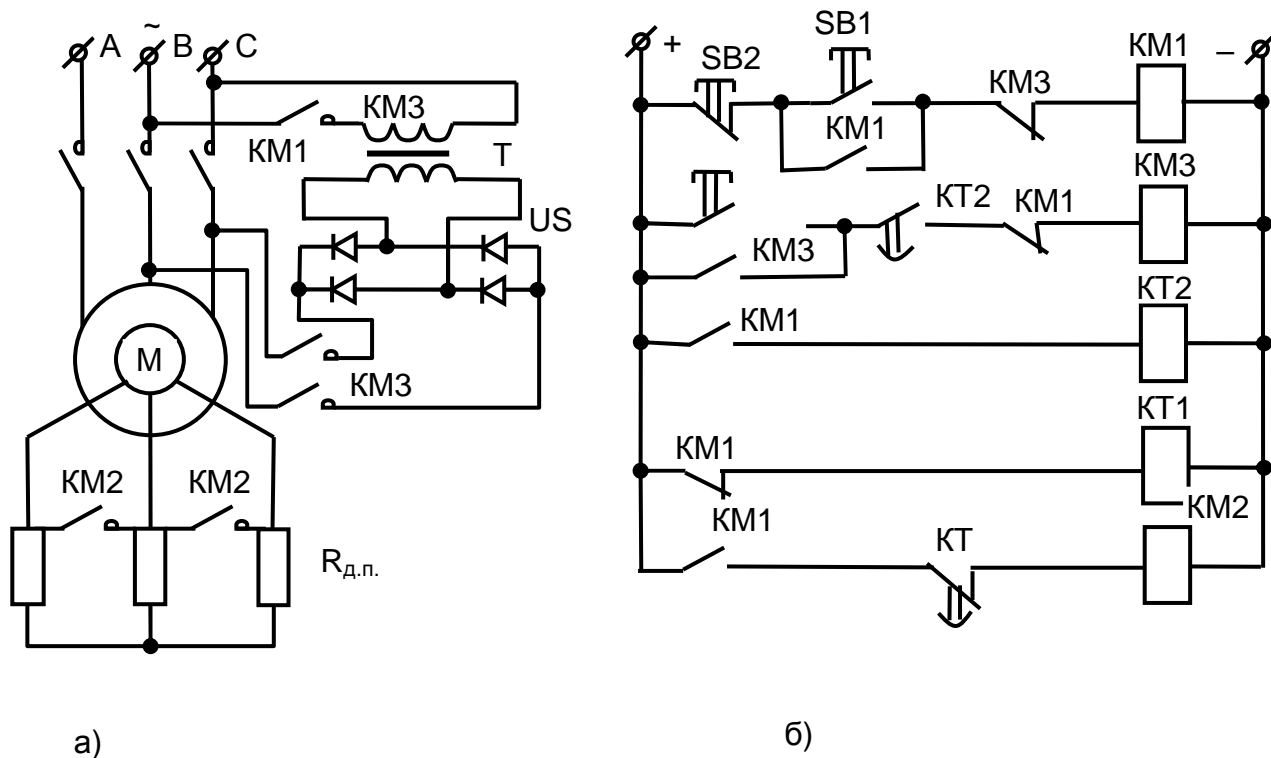


Рис. 2.11 – Типовой узел управления динамическим торможением АД с фазным ротором в функции времени:

а) силовые цепи; б) цепи управления

Автоматическое управление процессом торможения противовключением АД с короткозамкнутым ротором осуществляется с помощью реле контроля скорости КΩ. Схема типового узла приведена на рис. 2.12.

Схема применяется для остановки реверсивного двигателя. При работе двигателя переключающий контакт реле контроля скорости в зависимости от направления вращения находится в положении 1–3 («вперёд») или 1–2 («назад»). Введение КΩ в действие осуществляется только при подаче команды на остановку. Это обеспечивается блокировочным реле КV. В остальном эта схема обеспечивает управление реверсивным АД с к.з. ротором. Допустим, что *М* работал в направлении «вперёд», т.е. был включен КМ1 и

переключающий контакт $K\Omega$ замкнут в положении 1–3. При нажатии на $SB3$ включается KV . Размыкающий контакт KV отключает $KM1$, а замыкающий контакт KV через контакты 1–3 $K\Omega$ и замкнувшийся контакт $KM1$ включит $KM2$. Кнопка $SB3$ может быть отпущена т.к. KV становится на самопитание. Двигатель переходит в режим торможения переключателем. При $\omega \approx 0$ размыкается контакт 1–3 реле PKC и статор отключается от сети. При вращении двигателя в направлении «назад» и нажатии на $SB3$ схема действует аналогично.

Если необходимо реверсировать M без остановки, то нажимают на кнопку противоположного направления. Например, M работал в направлении «вперёд». При нажатии на $SB2$ её размыкающий контакт отключит $KM1$, а затем включится $KM2$. Двигатель переходит в режим торможения противовключением, а потом разгоняется в направлении «назад», т.к. катушка $KM2$ продолжит получать питание через размыкающий контакт KV до тех пор, пока не будет нажата кнопка $SB3$.

Типовой узел, обеспечивающий управление процессом торможения противовключением АД с фазным ротором при косвенном контроле скорости двигателя приведен на рис. 2.13.

Косвенный контроль скорости M осуществляется с помощью реле противовключения $KV2$. Его катушка через выпрямитель US подключена на зажимы обмотки ротора. Напряжение на катушке $KV2$ пропорционально скольжению s двигателя: $U_{KV2} \approx E_{2H}s$, где E_{2H} – э.д.с. ротора при $s=1$. С помощью $R_{РЕГ}$ реле настраивается так, чтобы оно срабатывало в самом начале процесса торможения, т.е. при $s \approx 2$ и отпускало свой якорь при скорости, близкой к нулю, т.е. при $s \approx 1$. При пуске $KV2$ не включится. На схеме цепи управления пуском представлены одной ступенью $R_{ДП}$, контактором $KV4$ и электромагнитным реле времени $КТ$. Отсчёт времени $КТ$ начинается с момента включения $KM3$.

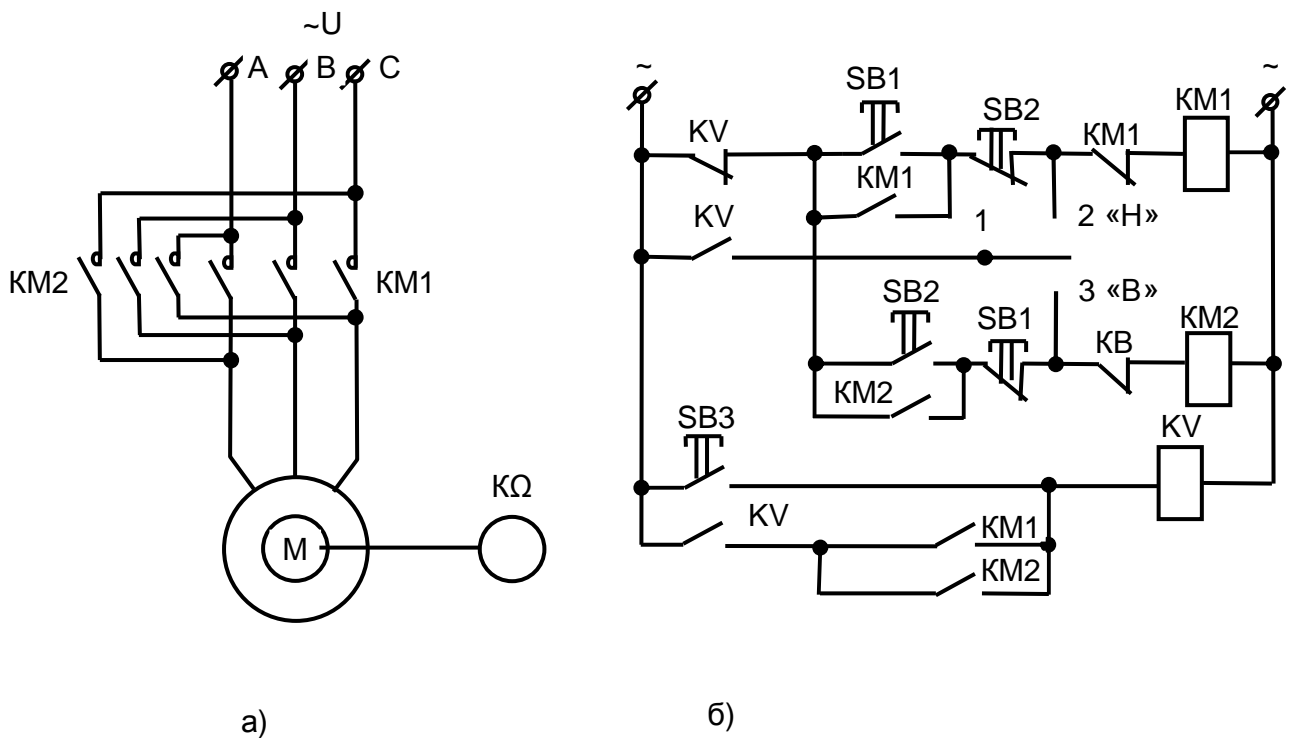


Рис. 2.12 – Типовой узел управления торможением противовключением АД с короткозамкнутым ротором в функции скорости:

а) главные цепи; б) цепи управления

Предположим, что M работал в направлении «вперёд». При нажатии на $SB2$ отключаются контакторы $KM1$ и $KM3$. В цепь ротора вводится $R_{дп} + R_{дпр}$. Затем включится $KM2$ и M переходит в режим торможения противовключением. При этом включается $KV2$ и размыкает свой контакт в цепи катушки $KM3$, не позволяя ему включиться и обеспечивая в цепи ротора $R_{дп} + R_{дпр}$. Для повышения надёжности этой операции применяют блокировочное реле $KV1$. Оно отключается при отключении $KM1$ и включится только после срабатывания $KM2$.

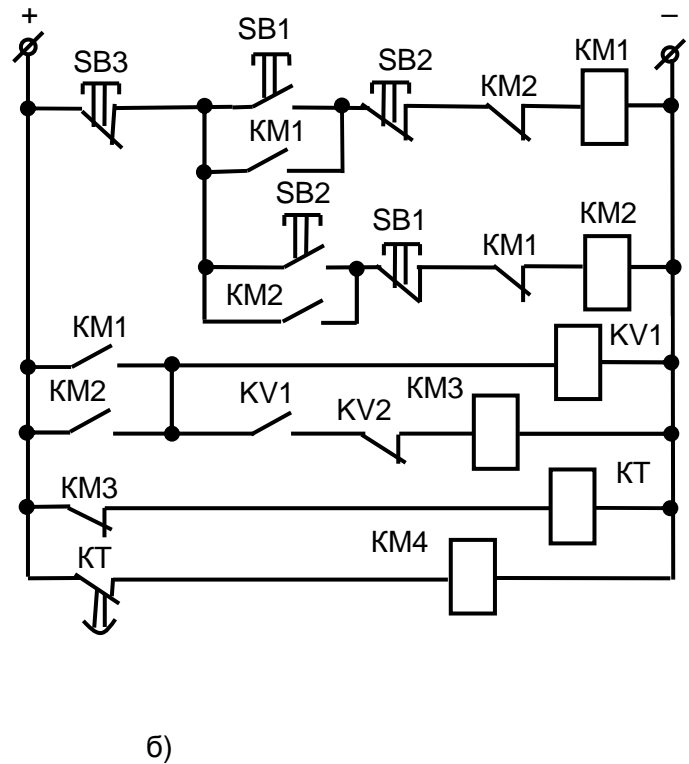
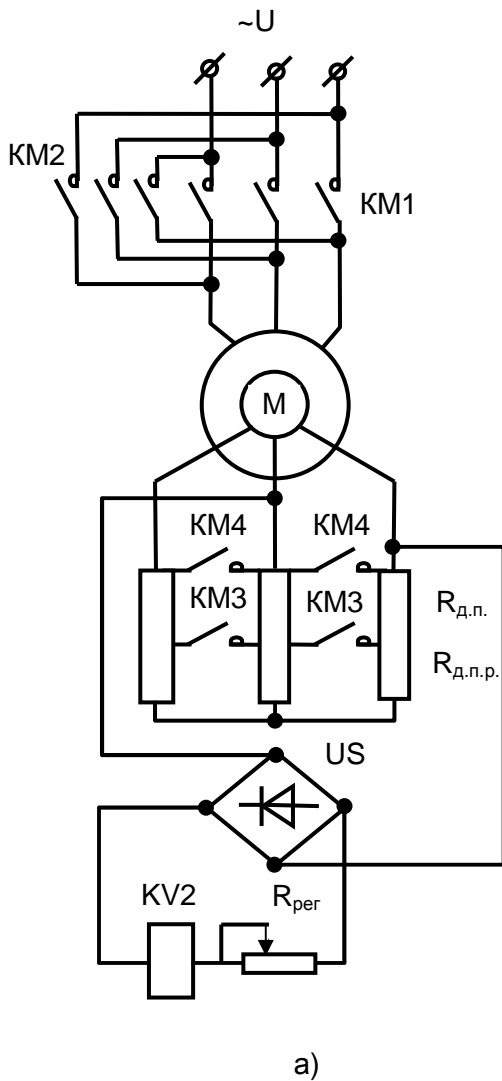


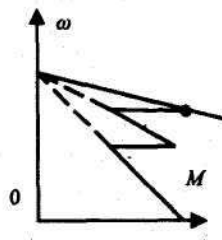
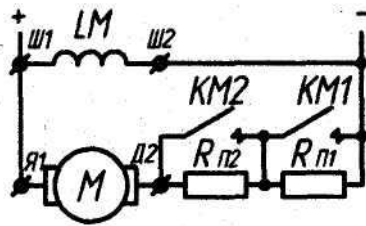
Рис. 2.13 – Типовой узел управления торможение противовключением АД с фазным ротором в функции скорости:
а) главные цепи; б) цепи управления

Тем самым создаётся временный разрыв в цепи катушки KM3. Когда контакт KV1 замкнется, реле KV2 уже успеет сработать и разомкнуть свой контакт. В конце торможения контакт KV2 замыкается, включается контактор KM3. Двигатель переходит на реостатную характеристику и разгоняется в направлении «назад». При обратном реверсе схема работает аналогично. При нажатии на SB3 *M* отключается от сети и тормозится под действием M_c .

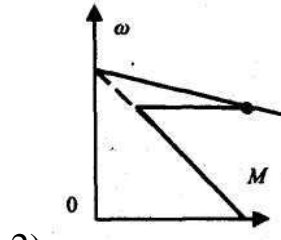
Литература: [2, с. 119-133, 189-191, 260-169; 3, с. 331-461; 4, с. 18-45].

Вопросы для контроля знаний

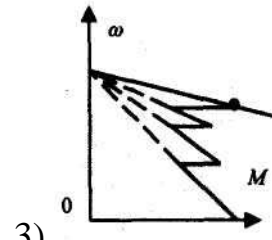
1. Приведенной схеме соответствует пусковая диаграмма



1)



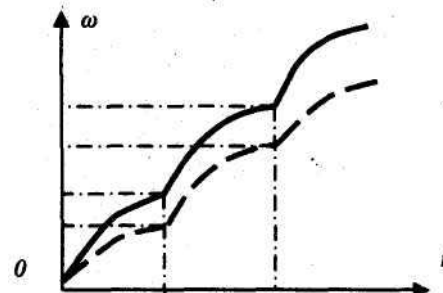
2)



3)

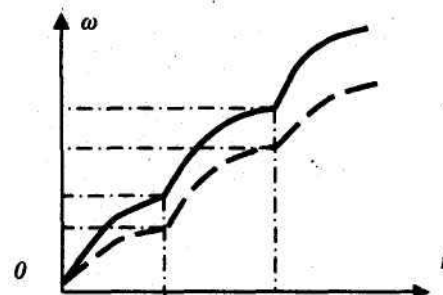
2. Пунктиром изображен график скорости при пуске с M_{c1} , а сплошной линией – с $M_{c2} < M_{c1}$. Пуск осуществляется функцией

- 1) времени;
- 2) скорости;
- 3) тока.



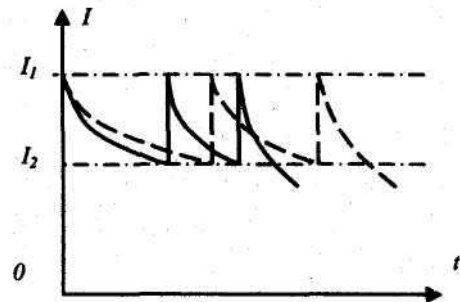
3. Пунктиром изображен график скорости при пуске с M_{c1} , а сплошной линией – с $M_{c2} < M_{c1}$. Пуск осуществляется функцией

- 1) времени;
- 2) скорости;
- 3) тока.



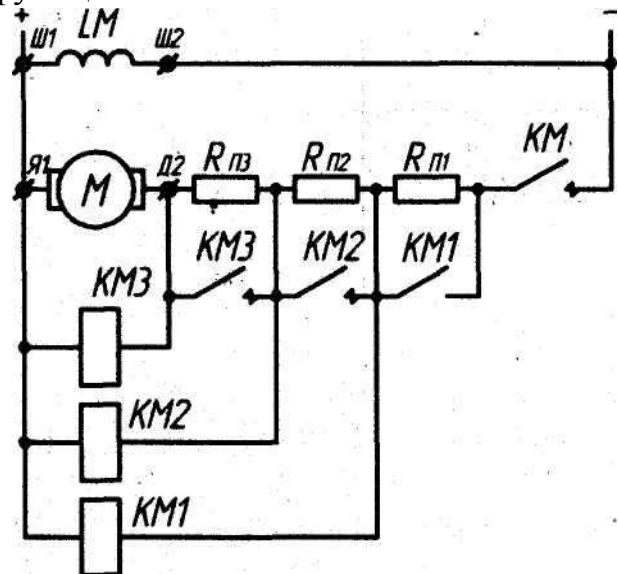
4. На рисунке изображены графики тока ДПТ НВ с номинальной нагрузкой (пунктир) и в холостую (сплошные линии). Пуск двигателя осуществляется в функции

- 1) времени;
- 2) скорости;
- 3) тока.



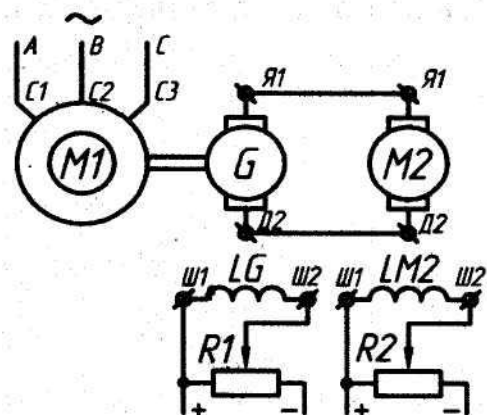
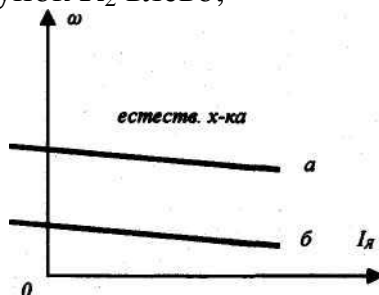
5. Схема обеспечивает пуск двигателя в функции

- 1) тока;
- 2) времени;
- 3) скорости.



6. Для перехода с характеристики *a* на характеристику *б* необходимо передвинуть

- 1) ползунок R_1 влево;
- 2) ползунок R_1 вправо;
- 3) ползунок R_2 влево;



Содержательный модуль 3.

Электрические расчеты и анализ типовых узлов защиты систем автоматизированного электропривода

Учебный элемент 3.1.

Узлы электрической защиты двигателей и схем управления

Для предотвращения выхода из строя и повышения надёжности электропривода применяют различные виды электрических защит.

Максимально–токовая защита. При коротком замыкании (к.з.) обеспечивает немедленное отключение от напряжения цепи, в которой произошло к.з. Осуществляется предохранителями с плавкими вставками FU; автоматами с электромагнитными расцепителями QF; максимальными токовыми реле КА1 и КА2. При мощности M до 10 кВт цепи управления защищают при к.з. теми же аппаратами, что и силовые цепи либо своими FU и QF. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.1.

Номинальный ток плавкой вставки $I_{вст.н.}$ и ток срабатывания $I_{уст.}$ QF и КА для защиты АД с к.з. ротором с начальным пусковым током I_n : $I_{вст.н.} \geq 0,4I_n$, при $t_n < 5с$ – лёгкий пуск; $I_{вст.н.} \geq (0,5-0,6)I_n$; $I_{уст.} = (1,3-1,5)I_n$. при $t_n > 10с$ – тяжёлый пуск.

Для защиты АД с фазным ротором и ДПТ $I_{вст.н.} = (1-1,25)I_n$; $I_{уст.} = (1,2-1,3)I_n$. Значение номинального тока I_n для двигателей S3 – режима берут при $PB=25\%$. Для защиты цепей управления $I_{вст.н.} = I_{уст.} = 2,5I_{кат.Σ}$, $I_{кат.Σ}$ – максимальный суммарный ток одновременно включённых аппаратов.

Защита двигателей от перегрева, вызванного перегрузкой по току осуществляется: при продолжительном режиме работы – с помощью тепловых реле КК или автоматических выключателей QF с тепловыми расцепителями; при повторно-кратковременном режиме работы – с помощью двух токовых реле КА1 и КА2, поскольку в этом режиме трудно согласовать тепловые характеристики реле и двигателя. В этом случае одновременно обеспечивается

защита M от работы на двух фазах. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.2.

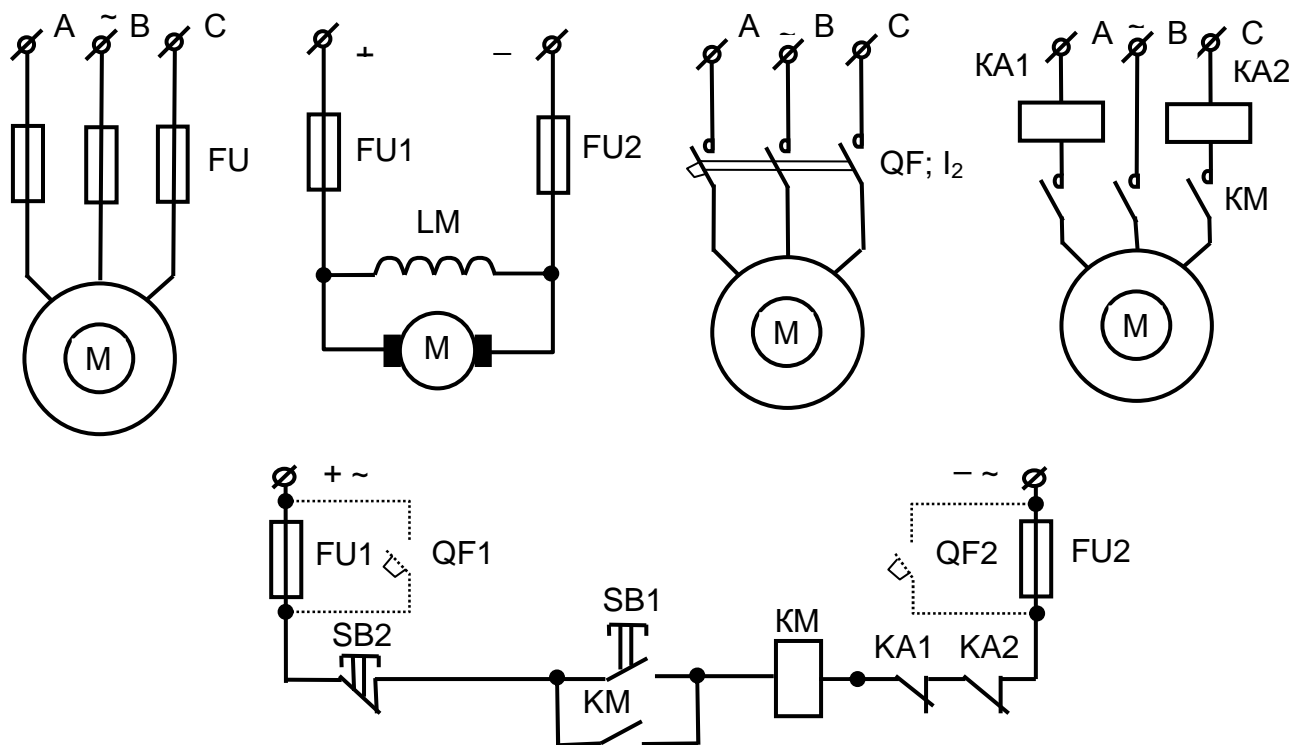


Рис. 3.1 – Схемы включения аппаратов защиты от токов короткого замыкания

Реле КТ исключает возможность срабатывания КА1 и КА2 при пуске. Реле КА3 служит для защиты при к.з. Номинальный ток нагревательного элемента теплового реле $I_{нагр.н.}$ или теплового расцепителя QF $I_{расц.н.}$ выбирают из условия $I_{нагр.н.} = I_{расц.н.} \approx I_n$. Ток уставки КА1, КА2 $I_{3ф} < I_{уст.} < I_{2ф}$, где $I_{3ф}$ и $I_{2ф}$ – токи M при работе на двух и трёх фазах.

Защита от самозапуска (нулевая защита). Схема, приведенная на рис. 3.3 обеспечивает отключение двигателя при исчезновении или чрезмерном снижении напряжения сети и предотвращает самозапуск - самопроизвольный пуск M после восстановления напряжения. При кнопочном управлении её осуществляет КМ. При управлении с помощью командоконтроллера – реле напряжения KV. В этом случае пуск возможен только после установки рукоятки командоконтроллера КК в нулевое положение. В цепь катушки KV

включаются контакты других аппаратов защиты. Если, наоборот, требуется обеспечить самозапуск M , то кнопки управления заменяют выключателями.

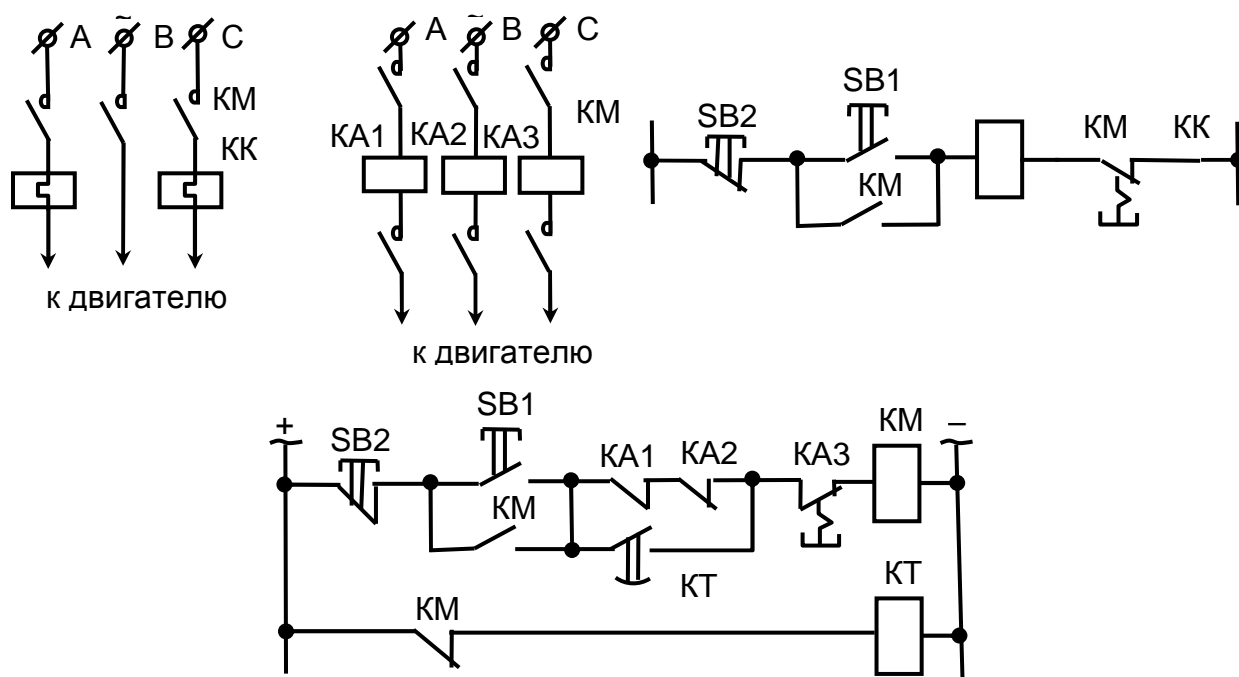


Рис. 3.2 – Схемы включения аппаратов тепловой защиты

Защита при обрыве поля, т.е. при обрыве цепи питания обмотки возбуждения ДПТ и СД осуществляется при помощи минимального токового реле КА, схема приведена на рис. 3.4. При обрыве в цепи питания ЛМ КА выключается и отключает двигатель. Защита от перенапряжения на ЛМ при её отключении осуществляется разрядным сопротивлением R_P . Диод VD устраняет потери энергии при работе двигателя.

Защиту от затянувшегося пуска СД, схема которой приведена на рис. 3.5, выполняют при помощи токового реле КА и реле времени КТ. Защита необходима, т.к. пусковая обмотка рассчитана на кратковременный режим работы. Выдержка КТ соответствует допустимой продолжительности пуска. Если к моменту срабатывания КТ ток возбуждения не достиг своего номинального значения и КА не включилось, то промежуточное реле KV срабатывает и двигатель отключится.

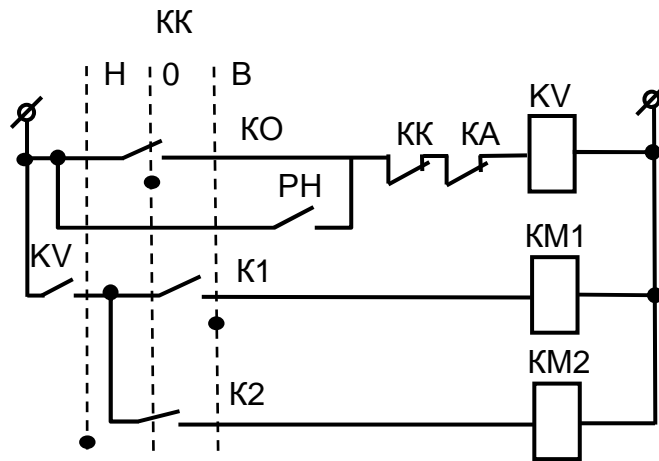


Рис. 3.3 – Схема включения защиты от самозапуска

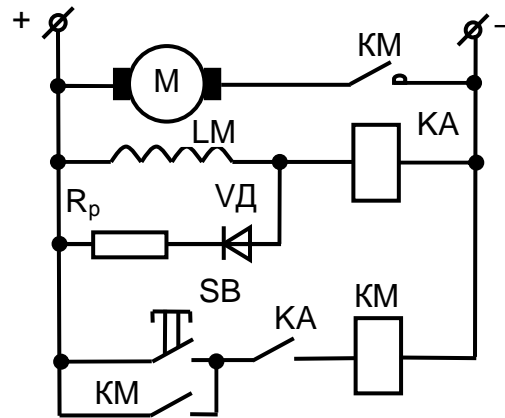


Рис. 3.4 – Схема включения защиты от обрыва поля

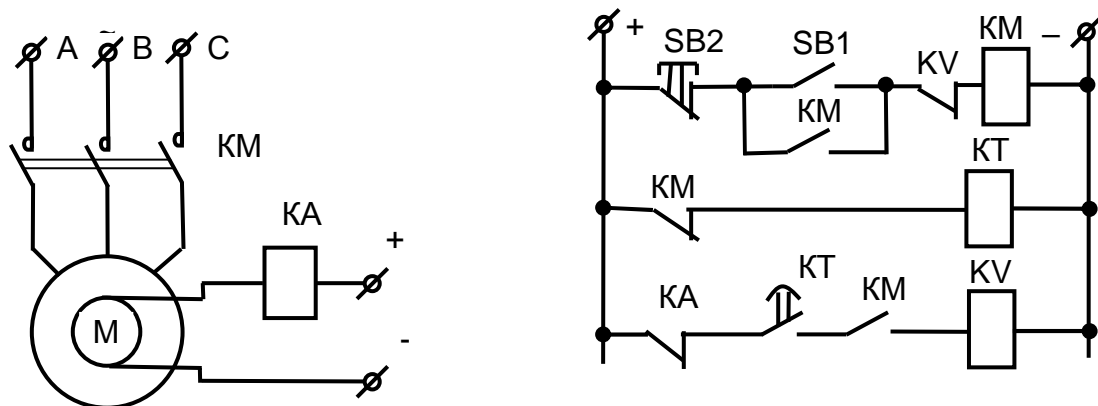


Рис. 3.5 – Схема включения защиты от затянувшегося пуска СД

Защита от выпадания из синхронизма СД, схема которой приведена на рис. 3.6, применяется для двигателей с резко изменяющейся нагрузкой на валу. Для сохранения перегрузочной способности M при снижении напряжения сети на 15–20% отключится реле минимального напряжения KV. Замыкается его контакт и включает контактор фазировки KM2. Последний своим контактом шунтирует реостат $R_{дв.}$ в цепи питания LG. Напряжение возбудителя, ток возбуждения и максимальный момент двигателя возрастают.

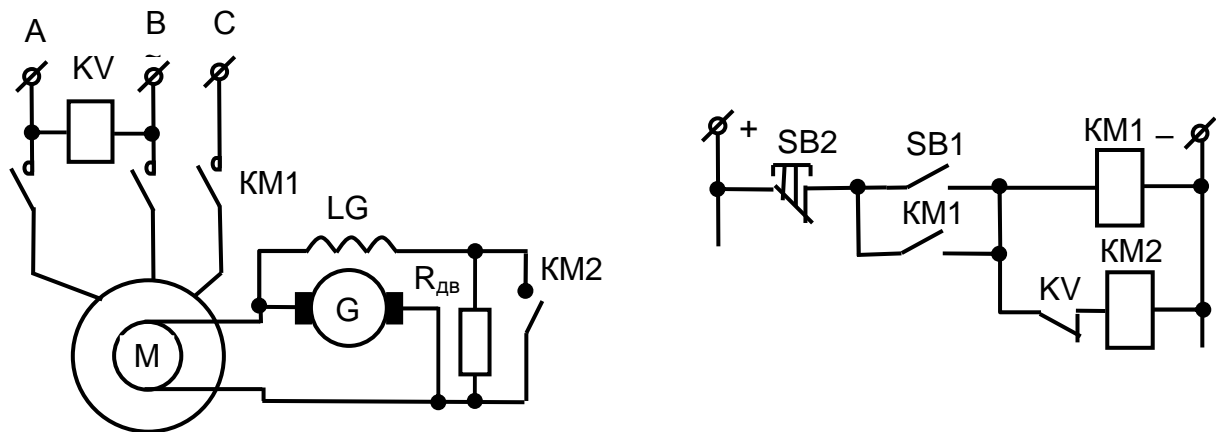
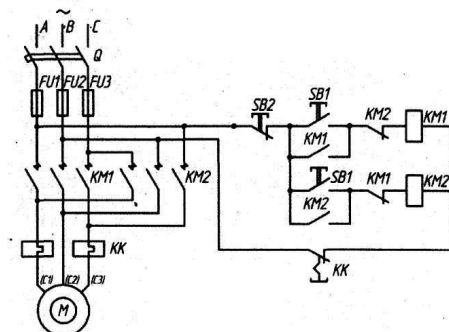


Рис. 3.6 – Схема включения защиты СД от выпадания из синхронизма

Литература: [3, с. 331-461; 4, с. 18-45].

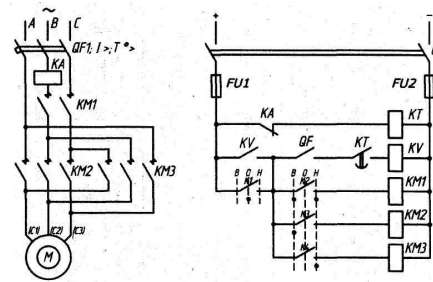
Вопросы для контроля знаний

1. Если цепь замыкающего контакта KM1 оборвана, то при нажатии на кнопку SB1
 - 1) двигатель не запустится;
 - 2) двигатель остановится при отпуске кнопки SB1;
 - 3) повреждение не повлияет на запуск и работу двигателя.



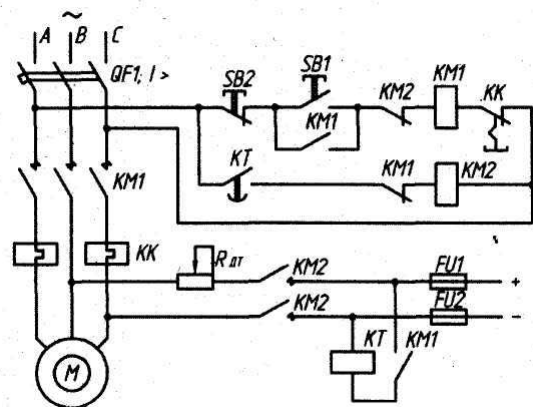
2. Если повреждена цепь замыкающего контакта KV, то при переводе рукоятки командоконтроллера из нулевого 0 в положение В двигатель

- 1) не запустится;
- 2) запустится «вперед»;
- 3) запустится «вперед» и остановится.



3. Если контакт реле KT приварился, то

- 1) двигатель не запустится;
- 2) не будет осуществляться торможение;
- 3) на статор будет подано одновременно постоянное и переменное напряжение.



НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки
до самостійного вивчення
з дисципліни

«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»

*(для студентів 3 денного і 4 заочного курсів форм навчання
за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка»
спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації і електропривод»)*

(Рос. мовою)

Укладач **ФАТЕЄВ** Віктор Миколайович

Редактор *З. М. Москаленко*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 199 М

Підп. до друку 12.05.2011

Друк на ризографі.

Зам. №

Формат 60x84/16

Ум. друк. арк.3,3

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12. 05. 2011 р.